

UNIVERSITE MONTPELLIER I
FACULTE DES SCIENCES DU SPORT ET DE
L'EDUCATION PHYSIQUE

THESE

en vue de l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE MONTPELLIER I

ECOLE DOCTORALE : SCIENCES CHIMIQUES ET BIOLOGIQUES DE LA SANTE

FORMATION DOCTORALE : SCIENCES DU MOUVEMENTS HUMAINS

Présentée par

Lorène DELCOR

DYNAMIQUE DE LA MEMORISATION D'UNE SEQUENCE DE
MOUVEMENTS MORPHOCINETIQUES

Soutenue le XX Décembre 2004 devant le jury composé de

Pr. Marielle CADOPI

Directeur de thèse

Pr. Didier DELIGNIERES

Co-directeur de thèse

Pr. Denis BROUILLET

Rapporteur

Pr. Bernard THON

Rapporteur

Pr. Marie-Dominique GIRAUDO

Examineur

III. 5. Conclusion	48
IV. Les modèles ARIMA (Box & Jenkins, 1976)	49
IV. 1. Identification et estimation des modèles	50
IV. 2. Les modèles Autorégressifs AR(p)	54
IV. 3. Les Modèles de Moyenne Mobile MA(q)	56
IV. 4. Vérification des modèles	57
PARTIE EXPERIMENTALE	59
I. Modélisation de la dynamique de mémorisation	60
I. 1. Méthode	62
✓ Sujets	62
✓ But de la tâche	62
✓ Matériels	62
✓ Procédure	65
✓ Traitement des données	65
✓ Analyse des données	68
I. 2. Résultats	68
I. 2. 1. Les 30 premiers essais	68
1. 2. 2. Les 30 derniers essais	71
I. 2. 3. Evolution de la structure des séries temporelles	72
I. 3. Discussion	73
II. Modélisation de la dynamique de la Distorsion	77
Expérience 1	77
II. 1. Méthode	83
✓ Sujets	83
✓ Procédure	83

✓ Analyse des données	83
II. 2. Résultats	83
II. 2. 1. Les 50 premiers essais	84
II. 2. 2. Evolution de la structure des séries des 50 premiers essais	85
II. 2. 3. Les 50 derniers essais	87
II. 2. 4. Evolution de la structure des séries 50 derniers essais	88
II. 3. Discussion	89
Expérience 2	93
II. 4. Méthode	95
✓ Sujets	95
✓ Procédure	95
✓ Analyse des données	95
II. 5. Résultats	96
II. 5. 1. Analyse des séries de 100 essais	96
II. 5. 2. Evolution de la structure des séries temporelles	97
II. 6. Discussion	99
III. Modélisation de la dynamique d'un souvenir moteur	102
Expérience 1	102
III. 1. Méthode	108
✓ Sujets	108
✓ Procédure	108
✓ Analyse des données	108
III. 2. Résultats	109
III. 2. 1. Analyse des séries temporelles de T1 sur 50 essais	109
III. 2. 2. Analyse de l'évolution des séries temporelles de T1	110

III. 2. 3. Analyse de l'évolution des séries temporelles de T2	111
III. 2. 4. Etude des niveaux d'exactitude	113
III. 2. 5. Etude de la succession des modèles	114
III. 3. Discussion	115
III. 3. 1. Discussion P6	115
III. 3. 2. Discussion P7	117
III. 3. 3. Discussion générale	118
Expérience 2	124
III. 4. Méthode	125
✓ Sujets	125
✓ Procédure	125
✓ Analyse des données	125
III. 5. Résultats	125
III. 6. Discussion	126
DISCUSSION GENERALE	128
REFERENCES	
ANNEXES	
Annexe 1 : Les consignes	
Annexe 2 : Les protocoles	
Annexe 1 : Les principaux modèles ARIMA	

POSITION DU PROBLEME

Lors d'une émission télévisuelle qui lui était consacrée, le chorégraphe Merce Cunningham précisait que lorsqu'il voulait reprendre un ballet créé quelques années plus tôt, il le présentait plusieurs fois à ses danseurs en vidéo. Certains, déjà membres de sa troupe lors de la création du ballet, pouvaient ainsi le « réviser », les nouveaux pouvaient s'en faire « une image » globale. Les répétitions viendraient ensuite pour approfondir le travail jusqu'à la représentation sur scène. Cette démarche très concrète pose une question théorique souvent investiguée : celle de la mémoire et du souvenir en général, mais elle concerne aussi la motricité, plus précisément la motricité morphocinétique.

Nous avons cherché dans cette thèse à approfondir cette problématique en analysant l'évolution temporelle de l'apprentissage d'une séquence de mouvements ainsi que son maintien en mémoire. Très traditionnellement dans l'étude de la motricité, l'apprentissage est analysé par la comparaison des performances « avant-après ». Certains travaux, plus qualitatifs et plus récents, ont mis l'accent sur les transformations qui apparaissent tout au long de l'apprentissage (Caillou, Nourrit, Deschamps, Lauriot, & Delignières, 2002 ; Delignières, Nourrit, Deschamps, Lauriot & Caillou, 1999 ; Nourrit, Deschamps, Lauriot, Caillou & Delignières, 2000, Vereijken, 1991 ; Vereijken, van Emmerick, Bongaardt, Beek, & Newell, 1997). Notre travail se situe dans cette deuxième perspective et vise à d'étudier dans le temps les processus de mémorisation et d'apprentissage d'une séquence de mouvements morphocinétiques, et le devenir de ce souvenir.

Dans une première partie, nous présenterons les données scientifiques relatives à la motricité morphocinétique, et les questions qui n'ont jamais été approfondies. La deuxième partie concernera les travaux anciens et plus récents qui ont étudié la mémoire au travers d'une problématique dynamique. Ces travaux sont scindés en deux parties : ceux qui étudient

la mémoire d'un point de vue dynamique (i.e. dans le temps) et ceux qui utilisent les concepts et les modèles de l'approche dynamique des systèmes complexes non linéaires. Cette partie théorique nous conduira à nous situer au regard de ces travaux et à souligner des caractéristiques saillantes de ces approches, entre autres la reconsidération du concept de variabilité. Nous présenterons la variabilité dans sa conception classique puis des données en faveur de sa reconsidération. Cette partie nous mènera assez naturellement sur une discussion d'ordre méthodologique, où nous présenterons notre outil d'analyse : les modèles ARIMA. La partie expérimentale qui suivra comprendra trois études : la première vise la modélisation du processus de la mémorisation et de l'apprentissage, la seconde se centre sur les productions inexacts de la mémoire : les distorsions ; enfin la troisième étude caractérise l'évolution temporelle des rétentions. Une discussion générale et des perspectives de recherche clôtureront notre travail.

I. La danse : une motricité particulière

Déjà Paillard en 1980 distinguait deux formes de motricité humaine : concrète et abstraite.

La première, qu'il qualifiait de "biologique", « topocinétique » dépend essentiellement des propriétés de l'environnement, de celles des objets sur lesquels agit le sujet et de ce sujet lui-même. « Les topocinèses sont des mouvements projetés dans l'espace recevant leur instruction d'un objectif spatialement repéré qu'il faut atteindre » : attraper un objet, dépasser un adversaire, atteindre une cible.

La seconde, qu'il qualifiait de « motricité de luxe », « morphocinétique » dépend essentiellement d'une « référence interne ». « Les morphocinèses sont des mouvements qui reçoivent leur instruction d'un modèle interne engendrant des formes motrices multiples : danse, patinage artistique, trampoline. La forme corporelle devient le but du mouvement qui n'est déclenché par aucun objet existant. Le sujet dessine alors dans l'espace « une intention gratuite qui se porte sur le corps propre et le constitue en objet au lieu de le traverser pour rejoindre à travers lui les choses. Le mouvement est alors habité ...par une fonction symbolique, une fonction représentative, une puissance de projection... » (Merleau-Ponty, 1945).

La motricité du danseur, se caractérisent par des propriétés soulignées par certains auteurs (Allard et Starkes, 1991 ; Cadopi, 1994, 1997) : c'est une motricité abstraite, qui se déploie principalement dans un milieu stable, constant, sans incertitude (sauf en ce qui concerne l'improvisation). Les habiletés motrices y sont « fermées » (Poulton, 1957) par opposition aux habiletés motrices « ouvertes » dans lesquelles le sujet doit s'adapter en cours d'action à des modifications de l'environnement imprévisibles ou difficilement prévisibles, que ce soit sur le plan spatial et/ou temporel et/ou événementiel. Dans les habiletés fermées, le sujet se consacre d'abord à acquérir un pattern moteur aussi proche que possible de celui qui

serait théoriquement le meilleur..., puis il s'attachera à travailler ce pattern afin d'en faire une habitude (Knapp, 1975). De plus, la motricité du danseur s'inscrit dans deux grandes catégories d'espace-problèmes : les reproductions ou « rappels moteurs » et les improvisation

Pour notre part, nous nous sommes intéressées aux tâches de reproduction de mouvements ou de séquences de mouvements. Ces tâches de reproduction peuvent varier suivant les modalités de présentation du modèle (présentation visuelle, verbale...), les parties du corps engagées (quelques segments ou l'ensemble du corps), ainsi que le contenu à rappeler. Les mouvements peuvent être spécifiés selon leur appartenance à un répertoire connu, leur possibilité de dénomination.

Classiquement, les performances des danseurs sont évaluées visuellement par rapport à des standards de référence ou modèles (Cadopi, 1995, Laugier & Cadopi, 1996). Le but de la tâche étant de reproduire le plus fidèlement une proposition extérieure de référence (Peix-Arguel, 1980), les variables de performance rendent compte de la fidélité des reproductions. On en distingue deux types (Laugier & Cadopi, 1996) : les variables quantitatives qui ont trait à l'ordre et au nombre de mouvements rappelés, et les variables qualitatives qui sont les caractéristiques topologiques ou spatiales des segments corporels et des coordinations (Newell, 1985), et les caractéristiques temporelles des mouvements. L'ensemble de ces variables a pour but d'évaluer les reproductions en rapport au modèle considéré comme une norme. La comparaison nécessite au préalable que les caractéristiques quantitatives et qualitatives du modèle soient identifiées, c'est à dire du point de vue du juge comme de l'expérimentateur qu'elles soient connues ou contrôlées. La complexité des tâches de reproduction réside dans le contrôle des segments, dans un ordre, un espace et un temps défini, c'est à dire conforme au « modèle ». Par ailleurs, une des spécificités de ces tâches est que le but de la tâche (la forme corporelle à atteindre) et les moyens (les mouvements) pour

atteindre cette forme sont confondus. En d'autres termes, la motricité est à la fois la finalité et le moyen pour réussir ces tâches. Ceci les distingue de la plupart des activités physiques et sportives où l'on peut séparer la performance (les modifications physiques avec le milieu) des moyens (les mouvements qui les ont produites).

Enfin, une des spécificités, et non la moindre, est que les pratiquants doivent souvent reproduire des séquences de mouvements à partir d'une démonstration qui vient d'être faite. On peut aussi leur demander de rappeler des séquences, parfois très longues, qu'ils ont déjà apprises. Dans les deux cas, le rappel se fait alors que le modèle n'est plus perceptivement présent. Le rôle de la mémoire semble donc essentiel. Les travaux concernant l'analyse des rappels moteurs en danse ont été menés dans le cadre des modèles théoriques du traitement de l'information faisant largement appel à la notion de représentation (Bandura, 1986 ; Schmidt, 1982). Ils montrent que le danseur effectue un codage représentatif de ce qu'il doit rappeler, élaborant ainsi une référence interne lui permettant non seulement de reproduire la figure ou l'enchaînement demandés mais aussi d'évaluer ceux qu'il exécute ou ceux qu'il voit. Il s'agit donc d'un contrôle représentatif de l'action qui peut être évalué aussi bien dans l'apprentissage que dans le produit de cet apprentissage. De nombreux travaux y ont été consacrés, que ce soit chez les adultes ou les enfants (Cadopi, Chatillon et Baldy, 1995 ; Laugier et Cadopi, 1996 ; McCullagh, Weiss et Ross 1989 ; McCullagh, Stiehl et Weiss, 1990 ; Weiss, Ebbeck et Rose, 1992 ; Minvielle-Moncla, Ripoll et Audiffren, 1999).

D'autres chercheurs se sont intéressés au rôle de la mémoire en danse. Les danseurs devant reproduire de longues séquences de mouvements, leur performance dépend de leur capacité à encoder, maintenir et retrouver les informations utiles. Deux courants de recherche permettent de rendre compte de ces performances : le premier s'intéresse à l'influence de la base de connaissances des sujets, le deuxième à la nature du codage de l'information en mémoire. Pour le premier, la supériorité des experts est due à l'influence de leur base de

connaissances sur la discipline, ce qui leur permet d'en reconnaître les patrons usuels. Les informations à mémoriser peuvent ainsi être regroupées en ensembles signifiants ou "chunks" et organisées hiérarchiquement, garantissant le stockage d'une plus grande quantité d'information ainsi qu'une récupération plus efficace. De plus, les liaisons usuelles entre éléments influencent la probabilité d'apparition d'un élément à la suite d'un autre, ce qui diminue la charge informationnelle et permet d'améliorer le stockage et la récupération de chaque élément. La connaissance de la discipline permet aussi aux experts d'étiqueter verbalement les mouvements, notamment en danse classique (Smyth & Pendleton, 1994, Starkes *et al.*, 1987). La supériorité des experts est donc strictement spécifique à leur domaine. Dans le second courant de recherche, Smyth et Pendleton (1994), Jean, Cadopi et Ille (2001), Jean (2001) ont analysé la nature du codage des informations dans la mémorisation de formes corporelles à partir du modèle de la mémoire de travail de Baddeley (1992). Les résultats montrent que l'utilisation de la base de connaissances joue certes un rôle mais que c'est essentiellement le calepin kinesthésique spatial qui rendrait compte des possibilités mnésiques importantes des experts, notamment quand les mouvements sont déjà connus.

Nous n'avons pas relevé dans la littérature de travaux centrés sur la dynamique de la mémorisation et de l'apprentissage d'une séquence de mouvement morphocinétiques. Par contre on relève des travaux qui se sont intéressés à la dynamique des processus mnésiques.

II. La mémoire

II. 1. Les travaux classiques sur la mémoire

L'étude de la dynamique de la mémoire prend son origine dans deux séries de travaux historiques, ceux d'Ebbinghaus (1885) et de Bartlett (1932).

II. 1. 1 Ebbinghaus (1885)

Historiquement, Ebbinghaus (1885) est l'un des premiers chercheurs à penser qu'une science expérimentale des processus mentaux était possible. L'objectif de son premier travail est de montrer que la méthode expérimentale pouvait être utilisée pour l'étude de la mémoire. Pour garantir l'objectivité de ses travaux, il utilise des listes de syllabes sans significations (trigramme consonne - voyelle - consonne), qui réduisent autant que possible l'influence de la signification. Il quantifie les performances mnésiques et modélise en fonction du temps leur évolution. Le résultat le plus célèbre est la courbe d'oubli où est mesurée l'économie au réapprentissage en fonction du temps (1880, 1885). Bien que ce soit les aspects méthodologiques des travaux d'Ebbinghaus (1885) qui aient été retenus comme héritage, ses réflexions sur le concept de mémoire constitue la première argumentation pour l'étude dans le temps de la mémoire (Gardner, 1985).

Pour Ebbinghaus, nos états mentaux antérieurs ne disparaissent pas totalement quand ils s'évanouissent de notre conscience. Il justifie ce point de vue au travers de trois types de réactualisation : la réactualisation volontaire qui se fait consciemment par un effort de rappel ; la réactualisation involontaire parfois après plusieurs années (acte de réminiscence), enfin nos états mentaux antérieurs influencent notre comportement actuel (Gardner, 1985). La dimension du temps est inéluctable puisque nécessaire à l'expression et à l'observation des

différentes formes de réactualisation de la mémoire. Ainsi, il inaugure d'une certaine manière les recherches expérimentales sur la mémoire dans une perspective dynamique.

C'est également l'étude du fonctionnement mnésique dans le temps au travers d'un protocole de rappel sériel que l'on trouve plus tard dans les travaux de Bartlett (1932), mais avec une différence importante portant sur le matériel à mémoriser.

II. 1. 2. Bartlett (1932)

Bartlett propose une approche radicalement différente de la méthode expérimentale qu'Ebbinghaus avait mise au point. Il juge que le matériel non signifiant n'est pas approprié, il pressent que les « éléments qui accompagnent une expérience ont un effet fondamental sur ce qui est mémorisé et sur la manière dont on s'en souvient ». Il met en place « la méthode de la reproduction en série » après que Norbert Wiener lui ait suggéré de s'inspirer du jeu « le téléphone arabe », pour étudier un processus dans le temps (Bartlett, 1958 cité dans Gardner, 1985, p.137).

Dans la série d'études de Bartlett (1932), des histoires exotiques, des figures géométriques ou encore des argumentations logiques étaient présentés aux sujets qui devaient s'en souvenir à divers intervalles de temps en vue de « comptes rendus ». Bartlett (1932) découvrit que les individus ne sont pas capables de se rappeler des données avec précision, et que les imprécisions (les distorsions) peuvent être systématisées. Pour interpréter ses résultats, il fait appel à la notion de schéma ou de *schémata*. Bartlett soutient le fait que le système mnésique humain implique la formation de structures cognitives abstraites ou schémas. Ces schémas se forment lors de rencontres antérieures avec le milieu extérieur, dont le résultat est l'organisation sur des modes spécifiques des différents types d'informations. Ces schémas nous sont utiles par la suite pour rappeler ces informations et pour enregistrer de nouvelles informations. Par exemple lors du rappel du conte « la guerre des fantômes », les sujets

utilisent leurs schémas sur les expériences quotidiennes en général, et sur les histoires de fantômes en particulier. Ce conte comporte des interruptions étranges et des liens de causalités bizarres ; par conséquent les sujets établissent leurs propres liens de causalité, et ils abandonnent les informations difficiles à assimiler et changent les actions jusqu'à ce qu'elles **constituent** une histoire plausible. Dans les rappels ultérieurs ces changements seront de plus en plus soulignés, jusqu'à ce que l'histoire prenne une forme plus stable.

Bartlett suggère qu'un souvenir sera facilité et pourra se révéler tout à fait précis dans la mesure où l'information contenue dans l'histoire sera cohérente avec les schémas structurés antérieurs. A l'inverse, les souvenirs d'une histoire divergente avec les schémas antérieurs présenteront des distorsions systématiques lors des premiers récits puis de simples déformations lors des récits ultérieurs.

Bartlett conclut de manière plus générale que : « la remémoration n'est pas la réexcitation de traces innombrables, fixes, sans vie et fragmentaires. C'est une reconstruction ou une construction, faisant appel à l'imagination et à la relation que nous avons à l'égard de toute une masse active d'expériences passées [...]. Elle n'est donc presque jamais vraiment exacte [...]. » (1932, p. 213). L'évocation d'un souvenir est un regard dans le passé (Bartlett, 1932) et constitue une activité reconstructive (Schacter, 1996).

Le résultat central, à nos yeux, des travaux de Bartlett est la mise en évidence de propriétés que semblent partager les souvenirs : i) les rappels ne sont jamais identiques à la source qui les a produits, ii) dans le temps, ils semblent subir des distorsions systématiques, iii) à l'état stable, (sans nouvelle distorsion) ils restent variables. Ces résultats font appel à trois notions du souvenir : l'exactitude du souvenir, la variabilité du souvenir et la dynamique du souvenir, que nous développerons dans la partie à suivre.

3 - L'exactitude de la mémoire

Un des objectifs de notre étude est de modéliser le processus de mémorisation **mis** à l'œuvre dans un apprentissage visuo-moteur, c'est à dire de déceler les propriétés « temps dépendantes » du comportement observé et d'en inférer une compréhension des processus mnésiques. Dans cette perspective, nous ne définirons pas la mémoire d'un point de vue structural, mais dans une perspective fonctionnelle.

Les travaux de Bartlett sont à l'heure actuelle associés à l'approche fonctionnelle, qui étudie comment l'organisme manipule et réorganise l'information à laquelle il vient d'être confronté (Gardner, 1985, Nicolas, 2000). « Pour le fonctionnaliste, la représentation de la connaissance n'est autre chose que le produit de l'interaction de l'organisme avec le monde extérieur. L'expression de la mémoire est la conséquence d'une interaction entre le système cognitif déclanchant certaines traitements mentaux (processus) et les demandes particulières de l'environnement » (Nicolas, 2000, p. 231). Cette **approche fonctionnelle** a pour point commun avec l'approche « centrée sur l'exactitude » de la mémoire d'être en rupture avec l'approche structuraliste. Koriat, Goldsmith et Pansky (2001) présentent cette approche centrée sur l'exactitude au travers de la métaphore de *correspondance*. Ces auteurs suggèrent que l'intérêt porté **aux** aspects qualitatifs de la mémoire (exactitude), par opposition aux études centrées sur les aspects quantitatifs, détermine notre conception de la mémoire. **Ils** soulignent **aussi** l'interdépendance qui existe entre un modèle conceptuel et les outils de mesure. **Dans** le cadre de notre étude nous associerons une mesure qualitative à des perspectives fonctionnelles de la mémoire. Nous étudierons les propriétés « temps dépendantes » de l'exactitude de la mémoire afin **d'approcher** une compréhension de son fonctionnement.

II. 2. Les travaux contemporains sur la mémoire

II. 2. 1. Etudes des processus de mémoire dans le temps

On observe dans la littérature un nombre grandissant de travaux qui s'intéressent à la dynamique des phénomènes d'apprentissage ou de mémorisation ; or ces travaux ne constituent pas un champ unitaire. Le terme de dynamique renvoie dans un premier cas à l'étude dans le temps des phénomènes (introduction de la dimension temporelle) et dans un second cas à l'utilisation des outils conceptuels et méthodologiques des théories de l'auto-organisation des systèmes complexes (Kostrubiec, 2001). Nous présenterons ces deux perspectives d'étude de la dynamique de la mémoire, à des niveaux d'analyse variés et nous nous situerons au regard de ces différents travaux.

La dimension temporelle présente dans les travaux sur la mémoire les plus anciens (cf. Ebbinghaus, 1885 et Bartlett, 1932) a commencé à disparaître lors du développement des conceptions structuralistes de la mémoire puis a disparu totalement de la littérature lors de l'avènement du courant computo-symbolique de la cognition. A l'heure actuelle, on note une recrudescence d'intérêt pour cette dimension qui s'exprime en psychologie avec la reprise de travaux anciens, et dans les neurosciences cognitives par l'élaboration de protocoles avec des essais répétés (permis par les progrès technologiques).

II. 2. 1. 1. Dynamique de la mémorisation d'une carte visuo-spatiale

(Giraud & Pailhous, 1999)

S'inspirant de la méthode de reproduction en séries de Bartlett (1932), Giraud et Pailhous (1999) ont mené une série d'études sur les propriétés « temps dépendantes » (i.e. dynamiques) de l'exactitude et de la variabilité d'une image visuo-spatiale en mémoire.

Pour cela, les auteurs ont mis en place une série d'expériences où les sujets devaient reproduire de mémoire une configuration de points qui leur avait été présentée visuellement. Pour chaque reproduction des sujets, un indice de performance, appelé exactitude, est extrait, qui rend compte de l'écart entre la reproduction et la configuration cible, ainsi qu'une mesure de la variabilité des reproductions, qui exprime l'écart de la reproduction à l'instant t avec la reproduction précédente (à $t-1$).

Une de leurs premières observations est qu'à l'état stable, lorsque l'écart entre les reproductions des sujets et la configuration requise ne varie pas statistiquement, l'écart entre les reproductions successives est aussi important que l'écart avec la configuration requise. Plus simplement exprimé, alors que l'indice de performance (l'écart à la cible) incite à conclure que l'image est stabilisée en mémoire à long terme, les rappels sont aussi inexacts que ce qu'ils sont variables entre eux (Giraudo & Pailhous, 1999).

Outre que ce type de phénomène (la variabilité d'un comportement à l'état stable) est rarement mis en lumière, ce résultat interroge quant à sa généralisation possible. En effet, l'importance des fluctuations par rapport à l'état de stabilité laisse difficilement penser qu'elles soient le résultat de changements mineurs, de différences de détail (Polsner, Nadel & Schacter, 1991), ou encore qu'elles soient insignifiantes (Giraudo & Pailhous, 1999). Par conséquent, ces constatations laissent penser que l'étude d'un phénomène tel que le rappel mnésique au travers de l'observation d'un comportement ou de la moyenne des comportements observés peut conduire à considérer comme inexact ce qui relève en fait de la variabilité du comportement (Giraudo, 1999).

Là sont deux conséquences de l'étude dynamique de phénomènes. Celle-ci nécessite l'emploi d'une méthodologie adaptée telle que les analyses des séries temporelles, qui mettent en lumière des propriétés non observées dans des conditions expérimentales différentes, et interrogent quant à leur universalité. Enfin, la modélisation des variations systématiques des

comportements à chaque temps t nécessite une reconsidération conceptuelle de la variabilité et l'emploi d'outils statistiques appropriés à son étude. Les statistiques et les conceptions classiques de la variabilité, loin d'éclairer les résultats, pourrait conduire à une interprétation erronée.

Dans ce qui suit nous présentons quelques résultats de travaux, tant comportementaux que neuropsychologiques, portant sur les propriétés temps-dépendantes de la mémoire, le concept de variabilité sera présenté en détail dans une partie ultérieure.

Giraudet Pailhous (1999) ont étudié la dynamique de l'exactitude et la dynamique de la variabilité d'une image lors de l'apprentissage d'une configuration visuo-spatiale pour tenter de répondre à la question « quelle condition doit remplir le système mnésique pour qu'un souvenir soit consolidé en mémoire ? » Dans une série d'expériences, ils ont à la fois mesuré la distance qui sépare les reproductions des sujets à la configuration cible (mesure de l'exactitude des reproductions) et la distance entre les reproductions elles-mêmes (mesure de la variabilité des reproductions) et ceci pour chaque temps t de l'apprentissage (à chaque essai).

En faisant varier les conditions expérimentales (en manipulant les présentations de la configuration cible), ils ont mis en évidence que la construction et la stabilisation d'une image en mémoire s'effectuaient à travers deux processus dynamiques : i) un processus de migration, qui a trait à la dynamique de l'exactitude, et qui rend compte de la migration des reproductions vers la configuration cible, ii) un processus de structuration, qui a trait à la dynamique de la variabilité, et qui rend compte de la structuration de l'image en mémoire. Pour ces deux processus, ils ont observé un seuil. Le premier seuil s'exprime au travers du processus de migration, c'est-à-dire de la réduction de l'écart entre les reproductions et la configuration cible, jusqu'à un écart minimum et stable. Le second seuil, celui du processus de structuration est appelé le niveau maximum de résolution de l'image, c'est le niveau pour

lequel les variations entre les configurations ne peut être davantage réduit. Toutefois, à l'état stable, lorsqu'il n'y a ni apprentissage, ni oubli, les reproductions restent variables.

De plus, ces auteurs ont mis en évidence qu'il était possible de créer un état stabilisé de distorsion, c'est-à-dire un état stable des reproductions mais pour un niveau d'exactitude loin du modèle. Ce résultat leur a permis d'observer qu'à deux niveaux stables d'exactitude (un faible et un fort niveau de distorsion par rapport à la configuration cible) correspondait un seul et même niveau de variabilité.

Enfin, bien que ces processus évoluent de manière parallèle dans les situations classiques d'apprentissage, ce qui pourrait suggérer qu'ils soient en relation, Giraudo et Pailhous (1999) concluent qu'ils sont indépendants. Cette indépendance s'exprime par l'observation d'une dynamique systématique du processus de structuration vers le seuil de résolution maximale de l'image, alors même que le processus de migration n'a pas lieu. L'atteinte systématique du niveau maximal de résolution semble rendre compte d'un état naturel du système.

Giraudo et Pailhous, qui définissent la mémoire comme la préservation (la rétention) dans le temps de représentations internes (images mentales), concluent que l'étude des images mentales en mémoire ne peut se réduire à l'étude des propriétés comportementales (l'exactitude des reproductions). Car l'étude seule des similitudes entre le percept mémorisé (les reproductions) et le percept présenté (la cible) ne permet pas d'observer le processus de structuration, processus indépendant qui semble rendre compte de l'état du système dans les fonctions de mémorisation (d'organisation) et de consolidation du contenu en mémoire. Ces auteurs prônent la nécessité de réintroduire l'étude de la variabilité des comportements, justifiant que la capacité adaptative d'un comportement, i.e. sa capacité à se modifier, est étroitement liée à sa stabilité, i.e. à sa capacité à se reproduire (Giraudo, 1999).

II. 2. 1. 2. Dynamique des patrons d'activations neuronales

(Petersson, Elfgren & Ingvar, 1999)

Des études en TEP (tomographie par émission de positons) ont tenté d'enregistrer la dynamique des changements des fonctionnements anatomiques des processus de mémoire et d'apprentissage dans une tâche de rappel de dessins abstraits (Petersson, Elfgren & Ingvar, 1999). Ces auteurs considèrent la mémoire et l'apprentissage comme des fonctions cérébrales fondamentales permettant au système nerveux central d'encoder les informations de l'expérience et de s'adapter à l'environnement non stationnaire. Ils définissent l'apprentissage comme les processus par lesquels le cerveau restructure fonctionnellement ses réseaux de traitements ou ses représentations d'informations en fonction de l'expérience. La trace mnésique est alors perçue comme le résultat du changement dans le système de traitement. Ces auteurs s'inscrivent dans une perspective de traitement distribué, et font l'hypothèse que l'apprentissage est une conséquence dynamique du traitement de l'information et de la plasticité du réseau (Petersson, Elfgren & Ingvar, 1997).

Pour tester leur hypothèse, ils mesurent l'activité de différentes régions du cerveau qui jouent un rôle fonctionnel lors de la mémorisation et de l'apprentissage. Leur tâche consiste à apprendre des listes de dessins abstraits, les sujets observent visuellement les dessins puis doivent les reproduire de mémoire. L'activité cérébrale est enregistrée, au repos, puis sur les deux premiers essais successifs, puis à l'issue d'une phase d'entraînement de six essais, sur deux essais successifs supplémentaires et ceci pour deux listes de dessins à apprendre.

Les auteurs s'intéressent à l'interaction fonctionnelle entre le lobe temporal médial et une activité fonctionnelle distribuée. L'activité du lobe temporal médial est enregistrée car il semble jouer un rôle essentiel dans la mémoire à long terme, plus particulièrement dans la consolidation des informations (Squire, 1992, 1997). L'activité perceptuelle et de la mémoire

à court terme, quant à elles, semblent être distribuées dans le néocortex (McClelland, McNaughton, & O'Reilly, 1995 ; Petersson, Elfgren, & Ingvar, 1997). Ces auteurs pensent que le stockage en mémoire à long terme des informations de cette activité néocorticale distribuée devrait engager à chaque temps de l'apprentissage le lobe temporal médial (Squire, 1992). Cette activation du lobe temporal médial pourrait rendre compte d'un processus de « fixation » (*binding*), encore appelé de cohésion ou de consolidation (Petersson, Elfgren, & Ingvar, 1997 ; Squire, 1997).

Les résultats mettent en évidence des changements des patrons d'activation neuronale entre les trois moments d'enregistrement : repos, début d'apprentissage et fin d'apprentissage. Plus précisément, l'activité des régions du lobe temporel médial décroît en fonction de la pratique. L'interaction entre lobe temporal médial et le néocortex est dynamique, change comme une fonction de l'activation répétée, i.e. de l'apprentissage et de l'encodage répété. L'évolution de cette interaction représente les conséquences dynamiques de la mémorisation et de l'apprentissage.

Ces données sont consistantes avec celles obtenues dans une tâche d'apprentissage verbal et dans une tâche d'apprentissage de séquence de mouvement (par essais et erreurs avec un feedback de la performance) où les régions liées aux fonctions de mémoire et d'apprentissage étaient activées en condition d'apprentissage mais ne l'étaient plus en condition de pratique automatisée (Jenkins, Brooks, Nixon, Frackowiak, & Passingham, 1994, cités dans Petersson, Elfgren & Ingvar, 1999).

Ces auteurs concluent sur le rôle dynamique que jouent certaines composantes neurales qui desservent la mémorisation et le rappel libre et sur la restructuration fonctionnelle du réseau de traitement de l'information lors du processus d'apprentissage (Petersson, Elfgren & Ingvar, 1999). Cette étude éclaire sur les propriétés temporelles de l'activité fonctionnelle. Elle permet d'estimer dans le temps l'évolution des processus de

mémorisation et d'apprentissage, au travers de l'activation et de la désactivation des différentes zones fonctionnelles. Elle permet d'objectiver le caractère temporel du processus de consolidation des informations en mémoire à long terme.

Les deux niveaux d'analyse que nous venons de présenter soulignent l'intérêt de l'étude dans le temps du fonctionnement de la mémoire : elle permet d'estimer d'une part la mise en activité d'un processus, son expression à un niveau comportemental ou neurologique, ses effets sur les performances de rappel, et d'autre part l'arrêt dans le temps de ce processus.

II. 2. 2. Modélisation dynamique des processus de mémoire

Le développement grandissant d'études comportementales (entre autres dans le champ de l'apprentissage et du contrôle moteurs), faisant appel aux cadres théoriques des systèmes dynamiques, de la synergétique, de l'auto-organisation, ou encore des modèles non-linéaires, nous offre des perspectives d'études, des outils ainsi que des concepts permettant la compréhension des phénomènes mnésiques. Les travaux utilisant le cadre conceptuel et méthodologique de la théorie de l'auto-organisation des systèmes complexes révisent dans leur choix épistémologique le concept de mémoire. Si ces travaux contribuent à rendre compte des phénomènes de la mémoire humaine, les positions conceptuelles qui les sous-tendent ne les positionnent pas pour autant uniquement dans l'ensemble des travaux qui s'intéressent aux seules propriétés « temps-dépendantes » des processus mnésiques.

II. 2. 2. 1. La mémoire émergente : une approche dynamique de la mémorisation (Kostrubiec, 2001)

Kostrubiec (2001) positionne clairement ses travaux en rupture avec les travaux classiques sur la mémoire. Son ouvrage vise à expliquer et à illustrer comment les théories de l'auto-organisation peuvent être une alternative aux *a priori* classiques des travaux sur la

mémorisation. Ces *a priori* classiques font référence au médiationnisme et au représentationnalisme. Dans cette perspective Kostrubiec situe (parmi d'autres) les travaux de Bartlett (1932) et de Giraud et Pailhous (1999) comme une tentative implicite de se débarrasser des présupposés hérités de paradigmes intuitifs newtonien et platonicien (pour une revue détaillée Kostrubiec, 2001, p. 80-85).

Kostrubiec préconise l'adoption des perspectives de la théorie de l'auto-organisation, et plus précisément de la synergetique, qui procure un modèle anti-mécaniciste et anti-médiationniste de la mémorisation. L'approche dynamique issue de la synergetique (Haken, 1983) soutient que tout système complexe s'auto-organise sous l'influence interactive des multiples contraintes qui pèsent sur son fonctionnement. Cette approche suggère que la mémorisation ne correspond ni à un processus spécifique, c'est-à-dire fonctionnant indépendamment des autres processus, ni à un processus complexe. Dans un système synergetique, il n'y a pas de processus fonctionnellement indépendant, le système réagit comme un tout aux modifications survenues dans n'importe quel endroit du système. De plus, la synergetique suggère que des configurations comportementales complexes sont produites par un nombre restreint d'opérations et de variables (Schöner & Kelso, 1988 ; Kelso, 1995). Enfin, les principes de la synergetique peuvent être appliqués à tout système complexe sans tenir compte de leur substrats matériels (Kelso, Buchanan, DeGuzman & Ding, 1993).

Mais là où les modélisations synergetiques sont les plus pertinentes (dans la perspective de rompre avec les présupposés théoriques classiques), c'est pour évincer la problématique médiationniste. En effet, les systèmes synergetiques ont une « mémoire », mais qui ne repose pas sur des mécanismes de conservation de traces. Dans un système dynamique non linéaire, les états présents sont dépendants des événements passés et les événements futurs seront fonction des états présents et passés. Les états du système sont une transformation non linéaire des états précédents. Le système évolue en fonction de ce qui s'est passé

précédemment, d'une certaine manière il se « souvient » de ce qui s'est passé avant. Enfin, l'état du système à l'instant t , malgré des séquences de comportements hautement complexes qui l'ont précédé, est toujours dépendant des conditions initiales du système. Ainsi si l'on fait varier, même de manière minimale les conditions initiales d'un système, il peut se produire des séquences de comportements très divergentes de celles auparavant observées. Cette sensibilité aux conditions initiales est désignée sous le nom de « mémoire permanente », qui n'est pas un mécanisme de conservation de trace mais qui est le produit des opérations de transformation des états du système (Kostrubiec, 2001). Ces deux phénomènes présentent l'intérêt majeur, pour l'approche synergétique de la mémoire, de modéliser des fonctions de mémoire sans faire appel à des médiations (traces, représentations, souvenirs).

Kostrubiec développe l'approche synergétique de la mémoire en reprenant les outils conceptuels et méthodologiques de la synergétique et plus particulièrement les données issues de l'approche dynamique des coordinations motrices (Haken, Kelso & Bunz, 1985 ; Kelso, 1995 ; Nourrit et al., 2003 ; Zanone & Kelso, 1992, 1997) qui ont conduit à des reconsidérations théoriques fructueuses du concept d'apprentissage. L'approche dynamique de l'apprentissage moteur modélise les comportements macroscopiques d'un système, au travers d'un paramètre caractérisant complètement et pertinemment l'état du système. Cette macro-variable est appelée « paramètre d'ordre » ou « variable collective » (Kelso, 1995). L'objectif de ces modélisations est d'étudier l'évolution temporelle des paramètres d'ordre en fonction de la variation du poids des contraintes environnementales : « les paramètres de contrôle ».

Kostrubiec (2001) se propose d'étudier la mémorisation comme un processus dynamique de catégorisation, puis de tester l'influence des catégorisations passées sur les catégorisations présentes. Plus précisément, au moyen des outils de la synergétique, elle cherche à spécifier « comment ces effets apparaissent, se maintiennent, se joignent,

interagissent et évoluent en fonction de l'évolution du flux perceptif » (Kostrubiec, 2001, p. 113). Pour cela, l'auteur développe une tâche de mémoire implicite, où est présenté un continuum de planches colorées allant d'une première planche appartenant à la catégorie perceptive « vert-noir » à la dernière appartenant à la catégorie perceptive « rouge-mauve ». Les sujets devaient catégoriser les planches dans l'une des deux catégories. Après une phase d'apprentissage des deux catégories perceptives, il y avait une phase de test, composé de deux présentations d'un continuum de 19 planches (dans un sens ascendant puis descendant), que les sujets devaient catégoriser. La comparaison des paramètres de transition obtenus dans les deux ordres de présentation du continuum met en évidence que la configuration d'hystérèse est dominante. C'est-à-dire que le paramètre de transition dans un ordre est plus élevé que le paramètre de transition dans l'ordre inverse, en d'autres termes les transitions ne se produisent pas au même moment, la transition dans un sens dépasse la valeur obtenue dans le sens inverse et *vice-versa*. Enfin, elle augmente la taille des effets de transition lors de la réduction de variabilité intra-individuelle, qui est permise par l'ajout d'un renforcement positif à l'issue de chaque réponse. Elle conclue sur l'importance de l'analyse individuelle qui permet la mise en lumière de la variabilité comportementale (variabilité intra-individuelle) et de la variabilité temporelle des performances de rappel.

Cette approche originale, qui analyse l'évolution de la catégorisation, essai par essai, suggère que la mémorisation est un processus non linéaire. Le modèle d'hystérèse rend compte d'un effet comportemental simple, permet une modélisation fonctionnelle sans médiation d'un effet *mnésique* et illustre le renouveau que peut permettre cette approche dans l'étude de la mémoire.

Dans le domaine de la motricité, Kostrubiec et Zanone (2002) reprennent la tâche de coordination bi-manuelle, objet de nombreuses études (Haken, Kelso & Bunz, 1985 ; Kelso, 1984 ; Zanone & Kelso, 1992, 1997) et étudient le fonctionnement de la mémoire au travers

des comportements adaptés aux contraintes de l'environnement qui sont produits. En d'autres termes, ils étudient le fonctionnement de la mémoire sur la base de leurs connaissances de la dynamique intrinsèque des patrons de coordination bimanuelle. Le paradigme des coordinations bimanuelles consiste à coordonner de manière répétitive et synchronisée deux membres homologues. Il a été démontré que ces coordinations s'expriment de manière préférentielle dans deux patrons comportementaux spontanés : le patron en phase et le patron en anti-phase (Kelso, 1981, 1984). Le premier patron se caractérise par une contraction simultanée des groupes musculaires homologues et le second par la contraction simultanée des groupes musculaires non homologues. Ces deux patrons spontanés sont stables, ils représentent des attracteurs, c'est-à-dire des points d'équilibre « stable » du système.

Sur la base de la connaissance de la dynamique intrinsèque des patrons de coordination bimanuelle, l'influence de l'apprentissage, de la mémoire, ou encore d'actions intentionnelles sur la dynamique comportementale ont été mises en évidence (Shöner & Kelso, 1988, Zanone & Kelso, 1992, 1994). L'influence de la mémoire est, par exemple modélisée comme l'effet d'un attracteur spécifique (Haken, Kelso & Bunz, 1985). Lorsque la mémoire dirige la coordination vers un des patrons de coordination préférentiels alors on observe une dynamique de coopération alors que lorsque la mémoire tend à diriger la coordination vers un patron non préférentiel on observe une dynamique de compétition. L'intensité de cette compétition, déterminée par la distance entre le patron désigné par la mémoire et les patrons préexistants détermine l'effort nécessaire pour apprendre et stabiliser ce nouveau patron. La compétition détermine aussi « l'attraction » de l'attracteur pré-existant envers le patron à apprendre, qui conduit à l'oubli par interférence (Shöner, Zanone & Kelso, 1992).

Kostrubiec et Zanone (2002) font l'hypothèse que la distance qui sépare le patron de coordination des patrons de coordinations préférentiels est objectivable par les valeurs de la

phase relative de chaque patron de coordination. La valeur de la phase relative du patron de coordination en phase correspond à 0° tandis que la phase de patron en anti-phase correspond à 180° . Les auteurs (2002) testent les patrons de coordinations correspondant aux phases relatives 90° , 135° et 158° , ce qui correspond à des distances de 90° , 45° et 22° avec les phases relatives des patrons préférentiels. Les sujets devaient reproduire ces patrons dans trois conditions i) de mémoire le plus précisément possible, ii) en synchronisant la coordination à des diodes lumineuses puis en poursuivant la coordination lorsque les diodes s'éteignent, iii) en synchronisant à nouveau la coordination avec des diodes avec en plus une connaissance du résultat. Les auteurs faisaient l'hypothèse que le patron de coordination pour lequel la distance entre les phases relatives était la plus petite serait le plus facile à apprendre, que l'exactitude serait élevée et la stabilité importante, et inversement pour la patron pour lequel la différence des phases relatives serait grande. Les résultats mettent en évidence que les patrons de coordination qui sont loin des attracteurs initiaux sont les moins exacts. La suppression du modèle visuel spécifiant le patron alors que l'apprentissage n'est pas terminé entraîne une diminution significative de l'exactitude des patrons rappelés de mémoire (tâche de poursuite). Ce résultat corrobore l'idée que la mémoire et l'information environnementale attirent le patron produit vers le patron requis avec une force qui est dépendante du degré de compétition de la situation. Mais de manière un peu surprenante on observe que la suppression du stimulus visuel (le modèle) affecte davantage l'exactitude que la stabilité. Les sujets semblent *préférer* produire des patrons stables et inexacts que précis et instables. Ce résultat suggère une sorte de compensation ou de concession entre l'exactitude pouvant être reproduite et une stabilité permettant la reproductibilité. Enfin les résultats sur la vitesse sont surprenants au regard des prédictions faites d'après le modèle de compétition-coopération (Haken, Kelso & Bunz, 1985). Les auteurs attendaient que la vitesse d'apprentissage soit proportionnelle à la différence de la phase relative entre le patron requis et le patron

préexistant. Les résultats mettent en évidence que les apprentissages les plus rapides sont obtenus à la fois pour les patrons requis les plus proches et les plus éloignés des patrons préexistants, c'est-à-dire pour un niveau de compétition le plus faible et le plus fort au regard de ce qui préexiste.

Les travaux de Kostrubiec (Kostrubiec 2001, Kostrubiec et Zanone, 2002), bien que fondés sur des conceptions non-représentationalistes et non-médiationnistes de la mémoire, suggèrent des propriétés auparavant mises en lumière par les études sur la dynamique de la mémorisation de Giraud et Pailhous (1999). Au niveau des performances mnésiques, on retrouve dans les travaux de Kostrubiec l'intérêt renouvelé pour l'observation de la variabilité temporelle, intra-individuelle ou encore inter-individuelle, qui permet de mieux appréhender le fonctionnement de la mémoire. Enfin, ces travaux suggèrent l'interdépendance qui semble exister entre les capacités adaptatives du système et ses propriétés de stabilité, en d'autres termes la relation qui existe entre sa capacité à se modifier et sa capacité à se reproduire (Giraud et Pailhous, 1999).

II. 2. 2. 2. L'approche dynamique de la cognition artificielle

Enfin, le champ de la cognition artificielle a vu émerger une approche centrée sur les capacités adaptatives d'un robot dans un environnement complexe qui s'inscrit dans les applications des théories de l'auto-organisation et des systèmes complexes. Cette approche se manifeste en réaction au paradigme cognitiviste, qui dans le cadre de la cognition artificielle, nécessite les connaissances et la programmation *a priori* des conditions dans lesquelles le système est testé et des données qu'il devra traiter (Guillot, 2002). Elle évince toute notion cognitiviste de représentation mentale et intègre l'action dans la construction des connaissances du système (Brooks, 1991). Brooks (1991), initiateur de cette approche, suggère de remplacer l'approche descendante, dans laquelle le cerveau organise de façon

centralisée les comportements, par une approche ascendante, dans laquelle ce sont les comportements activés en parallèle et interagissant avec l'environnement qui font émerger leur propre cohérence. Il nomma cette approche la « robotique comportementale » (*behavior-based robotics*), celle-ci est depuis renommée « approche animat » (contraction d'animal artificiel). « Le but de cette approche n'est pas de concevoir des systèmes aussi intelligents que l'Homme (objectif de l'intelligence artificielle où les facultés cognitives sont perçues comme les capacités élitistes de l'intelligence humaine) mais des systèmes aussi adaptatifs que l'animal ou l'humain, c'est-à-dire d'intégrer les processus adaptatifs aux facultés cognitives qui permettent à tout système d'élaborer de façon autonome des connaissances sur son environnement et de les utiliser afin de réaliser des tâches les plus efficacement possible » (Guillot, 2002, p. 20).

Associé à cette approche animat, un nouveau paradigme de la cognition artificielle naît, alternatif aux paradigmes computationalistes et connexionnistes, et issu de la théorie des systèmes complexes : l'approche dynamique. L'intérêt de cette approche, dans le champ de l'intelligence artificielle, est de reconnaître possible une activité du système sans intervention extérieure et d'intégrer son histoire au déterminisme de son comportement présent.

Deux types de modélisation ont retenu notre attention, qui rendent compte de « mémoire » dans des systèmes auto-organisés permettant la reconnaissance.

Daucé et Quoy (2002) adoptent l'hypothèse d'une mémoire adressable « par le contenu », en d'autres termes d'une mémoire distribuée où une connaissance mémorisée n'est pas localisée à une adresse, mais distribuée dans tout le système. Reprenant les théories de la synergétique, ils envisagent la capacité de reconnaissance ou de rappel d'une information comme le résultat d'un processus de convergence vers l'un des attracteurs du système (Hopfield, 1982, cité dans Daucé & Quoy 2002). Un attracteur simplement exprimé est un état de stabilité du système ; la reconnaissance s'exprimerait par une organisation stable du

système. Cette conception est inspirée des travaux de Skarda et Freeman (1987) qui ont étudié les effets de la présentation d'un stimulus connu ou inconnu sur l'organisation sous-corticale du bulbe olfactif du lapin. L'activité sous-corticale du bulbe olfactif présente une organisation récurrente et dont l'activation s'observe sur l'ensemble du bulbe. Lorsque l'on présente une odeur connue une réponse de l'ensemble du bulbe est observée qui « se manifeste par la diminution de la dimension fractale par la synchronisation de l'activité de populations neuronales (i.e. l'activité neuronale s'organise), alors qu'une odeur inconnue accentue le chaos de l'activité neuronale » (Nérot, 2002, p.83). La dynamique de ce bulbe complexe est assimilée à une trajectoire sur un attracteur. La reconnaissance olfactive correspond à une transition de phase d'un état de non connaissance caractérisé par une dynamique chaotique vers un état de connaissance qui se caractérise par une dynamique rythmée et régulière.

Daucé et Quoy (2002) proposent un modèle de réseau de neurones récurrent, dont le but est de modéliser un système dont la mémoire repose sur le comportement dynamique de neurones. Ces auteurs mettent en place un modèle de réseau à deux couches, capable d'apprentissage (pour plus de détails sur le modèle, Daucé, Quoy, Cessac, Doyon et Samuelides, 1998 ; Daucé & Quoy, 2002). Ils mettent en évidence que l'apprentissage se fait par résonance entre la première couche qui perçoit les informations, et la seconde couche de neurones qui ne reçoit pas directement de signal sensoriel et qui possède une dynamique propre. La résonance s'observe par la synchronisation de la deuxième couche sur le comportement de la couche primaire ; lorsque l'activité des deux couches est identique on est face à l'apprentissage du stimulus. Lorsque le signal d'entrée est modifié (on présente un autre stimulus), un comportement désordonné apparaît au niveau de l'activité des neurones de la seconde couche. Enfin lorsque le stimulus appris est représenté (ou une simple partie de ce stimulus), on observe une activité au niveau de la couche secondaire équivalente à celle observée à la fin de l'apprentissage. « Le système rejoint un attracteur qui est similaire à

l'attracteur atteint à la fin de l'apprentissage. » (Daucé & Quoy, 2002, p. 103). Ce résultat suggère aux auteurs que c'est un mécanisme possible mis en œuvre lors du rappel de souvenirs. « Un signal décrivant partiellement une connaissance mémorisée entre en *résonance* avec la dynamique interne, ce qui a pour conséquence de produire une évocation de la totalité de l'expérience sensorielle associée à ce souvenir (Daucé & Quoy, 2002, p. 103).

Daucé et Guillot (2002) concluent que l'approche dynamique apporte une contribution importante à la conception des systèmes artificiels situés. Elle permet de distinguer deux aspects complémentaires de la cognition humaine. i) l'activité cognitive repose sur une interaction réciproque entre un corps et un environnement. En ce sens, l'activité cognitive ne peut être totalement détachée de cette interaction réciproque et ne peut être vue comme strictement individuelle, ii) l'activité cognitive inscrite dans un corps interagissant n'est pas strictement identifiable à une dynamique d'interaction. Une des caractéristiques fondamentales des organismes vivants est leur autonomie, c'est-à-dire leur capacité à agir selon leur propre loi (leur dynamique interne).

Il existe un conflit potentiel entre la dynamique interne et les contraintes environnementales. Pour ces auteurs c'est de ce processus doublement contraint que semble émerger l'activité cognitive. « En effet, un agent réagissant passivement aux seuls signaux de l'environnement, bien qu'interagissant, n'a pas d'initiative, ne produit pas de choix, ne prend pas en compte son passé. A l'opposé, un agent ne prenant en compte que son état interne pour déterminer son action n'est en aucune façon adapté ni adaptable. (Daucet et Guillot, 2002, p. 305). Ce sont deux caractéristiques contradictoires qui déterminent l'aptitude cognitive complexe.

II. 3. Conclusion sur les travaux sur la dynamique de la mémoire

La présentation de ces différents travaux n'avait pas pour objectif de présenter une revue exhaustive des travaux s'inscrivant dans l'étude dynamique de la cognition. Mais il nous semble qu'ils sont représentatifs de la tendance qui consiste à investir la cognition selon une perspective dynamique et dans des champs d'étude de la cognition très variés. Il paraît donc intéressant de synthétiser un certain nombre de points vers lesquels ces études convergent.

L'approche *dynamique* apporte une nouvelle dimension à l'étude de la mémoire (ou des systèmes à mémoire) en s'intéressant aux changements au cours du temps et en délaissant les questions structuralistes ; en cela elle partage des conceptions avec l'approche fonctionnelle de la mémoire. L'approche dynamique intègre l'idée que les capacités adaptatives d'un organisme, d'un système ou d'un agent émergent d'une interaction constante entre son système nerveux, son corps, et son environnement (Guillot, 2002). La manière dont sont générés les comportements est perçue comme une réorganisation en fonction des contraintes externes et internes. Par conséquent, un état (du système, de l'organisme ou l'agent) à un instant t se comprend par la dynamique de ces interactions passées et présentes et détermine ces états futurs. Cette manière de mener les études sur la mémoire se recoupe avec l'approche fonctionnaliste de la mémoire. En effet , « les fonctionnalistes affirment que la mémoire n'est pas un lieu où sont déposées nos connaissances mais plutôt un ensemble de procédures, d'opérations ou de façons d'encoder l'information qui change en fonction des rencontres avec celle-ci. L'approche originale du fonctionnalisme est de considérer que l'expression de la mémoire est la conséquence d'une interaction entre le système cognitif déclenchant certaines opérations mentales et les demandes particulières de l'environnement » (Nicolas, 2000, p. 159).

Le second point commun de ces études est que la mémoire, les processus de mémoire ou les performances de la mémoire sont évalués de manière qualitative. Cet aspect méthodologique est étroitement lié à une conception de la mémoire humaine (Koriat et Goldsmith, 1996, Koriat, Goldsmith et Pansky, 2000), en rupture avec les approches structuralistes. Elle s'inscrit dans une perspective d'étude écologique et entretient des liens avec l'approche fonctionnelle.

Enfin, les variations des performances ou des comportements sont le centre d'intérêt de ces études. Ce sont les variations dans le temps qui renseignent sur les fonctionnements de la mémoire. Elles sont observées de manière individuelle et mesurées pour chaque temps de l'apprentissage ou de manière continue sur l'échelle du temps. L'étude de ces variations permet de définir ce qu'est un état de stabilité au vu des variations irréductibles (la variabilité) qui, si on se donne la peine de les observer, sont trop systématiques pour être ignorées ou considérées comme n'ayant pas de signification. L'observation systématique de cette variabilité conduit à s'interroger sur la généralisation de ce phénomène, sur son sens, sa nature, ses sources. Intégrée aux problématiques de mémoire, sa (re)considération nous offre des perspectives d'études et de compréhension du fonctionnement mnésique.

III . La variabilité

La reconsidération du statut et du rôle de la variabilité est une position de plus en plus répandue dans les sciences cognitives, le peu de travaux sur la variabilité d'un souvenir n'est pas lié à l'objet d'étude, mais à la discipline toute entière (Lautrey, Mazoyer & van Green, 2002). Il est de tradition, en psychologie cognitive, d'assimiler la variabilité d'un phénomène observé à du bruit. La recherche d'universaux a conduit à centrer l'analyse sur les tendances moyennes et à attribuer la variabilité observée autour de ces tendances à des erreurs aléatoires ou aux propriétés de la distribution. L'utilisation systématique de l'écart type dans les études en atteste. Cet indice fournit une indication sur l'ampleur des variations d'un paramètre, et mène à des conclusions sur le niveau de bruit présent dans le système. Les variations intra-individuelles, quant à elles, sont considérées comme l'expression des erreurs du sujet, d'erreurs aléatoires. Bien que systématiquement présentée, la variabilité est dépourvue de sens et de fonction.

Lautrey, Mazoyer et van Green (2002) suggèrent que nous sommes à une époque où le regard porté sur la variabilité dans les sciences cognitives évolue. Ces auteurs précisent que les choix des formes de variabilité prises en considération sont dépendants des courants théoriques, des connaissances recherchées et des outils utilisés. Nous présenterons d'abord quelques données sur erreur et variabilité puis le concept de variabilité dans son expression « classique » et, enfin quelques reconsidérations de ce phénomènes proposées dans la littérature. Le regain d'intérêt pour ce concept s'observe en partie dans le développement de travaux qui ont pour objet d'étude les erreurs et les distorsions dans les comportements. Les concepts d'erreur et de variabilité ont longtemps été confondus, par conséquent l'étude des seules erreurs suppose de reconsidérer cette assimilation.

III. 1. Variabilité et erreur

James Reason (1990), dans son ouvrage « L'erreur humaine », illustre la distinction qui existe entre variabilité et erreur au travers de l'étude de deux configurations d'impacts de tirs sur des cibles. La première cible, appelée A, présente des impacts autour du centre de la cible mais qui sont assez dispersés. A l'inverse, la seconde cible B présente des impacts très regroupés mais qui sont éloignés du centre de la cible. Ces configurations amènent à distinguer deux types d'erreurs : les erreurs variables et les erreurs constantes. En effet, la configuration A présente peu d'erreurs constantes et beaucoup d'erreurs variables, tandis que la configuration B présente beaucoup d'erreurs constantes et très peu d'erreur variables. Dans cette exemple, la variabilité est illustrée par l'éparpillement des impacts individuels, c'est-à-dire par ce qui est appelé l'erreur variable. Tandis que l'erreur constante est matérialisée par la distance entre la moyenne des impacts et le centre de la cible, elle représente le niveau d'inexactitude des performances. Les conclusions sur la moyenne des scores aux tirs, inciteraient à donner A comme étant un meilleur tireur que B. Or, si on considère ces deux types d'erreur, il s'avère que B est un tireur précis dont les visées sont déviées tandis que A est un tireur inégal avec des visées correctement alignées. On serait capable de prédire avec une grande précision le futur tir de B alors que la variabilité des tirs de A rend quasiment impossible une prédiction correcte. Cela nous renvoie à la conclusion que la compréhension du processus qui a produit les performances de A et de B nécessite une connaissance de la variabilité qui les accompagne.

Dans le champ de l'étude de la mémoire, on retrouve quelques travaux portant sur les mécanismes cognitifs impliqués dans la production d'erreur. Les travaux de Bartlett (1932) sont particulièrement aboutis. Bartlett fait appel à la notion de schéma pour expliquer les erreurs systématiques qui apparaissent dans le rappel de matériel figural et textuel (cf. II. 1. 2. Bartlett (1932), p. 11). Il définit le schéma comme « une organisation active des réactions

passées ou d'expériences passées, que l'on doit toujours supposer à l'œuvre dans toute réponse organique bien adaptée. Ceci veut dire que, à chaque fois que le comportement se révèle ordonné et régulier, une réponse particulière n'est rendue possible que par sa relation à d'autres réponses similaires, qui ont été organisées séquentiellement, mais qui opèrent néanmoins comme une masse unitaire et non comme des éléments individuels venant l'un après l'autre » (1932, p. 201). Les schémas reconstruisent plutôt qu'ils ne reproduisent les expériences du passé. La compréhension du fonctionnement « restructif » permet de prédire certains biais dans les rappels, et réciproquement, la compréhension des erreurs permet la compréhension du système qui les a produit. Bartlett interprète et donne du sens aux variations et aux erreurs observées au travers de la compréhension des propriétés et du fonctionnement du système mnésique. L'auteur, à l'inverse de la conception actuelle encore dominante qui considère les variations comme l'expression d'erreurs aléatoires ou de bruit, envisage les erreurs comme l'expression des propriétés et du fonctionnement du système mnésique.

Les travaux centrés sur les erreurs de la mémoire ont été peu nombreux. On notera que les rares travaux qui abordèrent cette question se recourent sur leur intention de mettre en lumière le caractère restructif de la mémoire (Deese, 1959 ; Underwood, 1965).

A l'heure actuelle, on remarque une recrudescence des travaux se développant autour des erreurs de mémoire. On observe des attentions toutes particulières portées aux distorsions des rappels, ou encore ce que l'on nomme les *faux souvenirs* (Roediger III et McDermott, 1995), qui sont un type d'erreur de mémoire correspondant à des événements vécus comme des souvenirs authentiques bien qu'ils n'aient pas réellement eu lieu. Ces travaux s'inscrivent dans une conception fonctionnelle de la mémoire, où les erreurs sont le témoignage de l'interaction entre l'individu et son environnement et de l'activité restructrice de la

mémoire. Dans ces études les erreurs de mémoire fourniraient des indices significatifs sur la façon dont on se souvient du passé, parce qu'elles sont le produit de propriétés fondamentales de nos systèmes mnésiques et, par conséquent, elles les éclairent (Schacter, 1996, p. 20).

Enfin, on remarquera que l'exemple de Reason, et particulièrement l'analyse des performances par la décomposition entre erreur variable et erreur constante, renvoie aux mesures de Giraud et Pailhous (1999) qui distinguent systématiquement dans les performances de rappel l'erreur à la cible de la variabilité des rappels entre eux. Ces démarches visant à distinguer ce qui relève de l'erreur de ce qui relève de la variabilité conduisent nécessairement à repenser la variabilité des phénomènes étudiés, considérant la variabilité comme une variable du système à part entière qui, par son étude, peut apporter des informations sur les propriétés du système considéré.

La nécessité de rendre compte de la variabilité des comportements dans les modèles généraux de la cognition peut se justifier par le simple fait que toute tentative de reproduire une action, même dans des conditions de réalisation identiques, s'accompagne inévitablement de variations. L'ubiquité de la variabilité laisse à penser qu'elle est un élément essentiel des systèmes biologiques humains. Cette prise de position s'accompagne d'une question sur l'origine de cette variabilité, sur son sens et ses fonctions. Auparavant nous présenterons la conception classique de la variabilité : sa mesure, son interprétation et ses limites.

III. 2. Le concept « classique » de variabilité

L'investigation la plus courante dans la littérature est celle qui étudie la variabilité des phénomènes observés au travers de la mesure de la variance autour de la moyenne, opérationnalisée par l'écart type. Cette opérationnalisation guide la compréhension intuitive

du terme de variabilité et son emploi dans les théories de la cognition ou du contrôle moteur (Newell & Corcos, 1993 ; Riley & Turvey, 2002).

Face à cet emploi massif de l'écart type pour rendre compte de la variabilité, Newell et Corcos (1993) rappellent les principes statistiques sur lesquels repose l'écart type. L'écart type est une mesure statistique de la distribution d'un paramètre autour de sa moyenne. La déviation standard ne fournit pas d'information sur la structure de la variabilité, elle informe seulement sur le degré de variabilité d'un élément donné du système. Or, ces auteurs suggèrent que les inférences classiques faites autour de cette mesure de la variabilité dépassent les informations fournies par l'écart type, ou encore qu'elle ne font pas l'objet des vérifications statistiques nécessaires.

Classiquement la variabilité est assimilée à une mesure du bruit ou à un index de stabilité du système. Et cette mesure est utilisée comme un index de performance à part entière, c'est-à-dire comme informant sur la réussite de la tâche (Newell & Corcos, 1993, Slifkin & Newell, 1998). Une variabilité élevée observée dans la réalisation d'une tâche est en général perçue comme un index de performance faible tandis qu'une faible variabilité est généralement considérée comme un index de performance de niveau élevé. Cette interprétation repose sur l'assomption que la variabilité est l'expression d'une stabilité réduite du système, elle est un héritage des modèles issus de l'approche du traitement de l'information (Fitts, 1954 ; Shannon, 1948). Le degré de consistance des performances est largement assimilé au niveau de connaissance et de contrôle de la tâche (Slifkin & Newell, 1998). En fait cette assimilation simplifie la relation qui peut exister entre la variabilité et la stabilité d'un phénomène. Enfin, cette position était maximisée par la quête d'invariants dans les études de la cognition et du contrôle de la motricité. Par ailleurs Newell & Corcos (1993) suggèrent que la véracité du résultat, que la variabilité réduit en fonction de la pratique et du développement de l'habileté, l'est surtout pour des tâches avec un minimum de degrés de

liberté. Dans les tâches où de nombreux degrés de liberté sont à coordonner pour réduire la variabilité de la réponse, la relation n'est pas aussi directe. Un résultat convaincant est celui obtenu lors de l'étude de la réduction de la variabilité de la performance dans une tâche de tirs au pistolet. La réduction de la variabilité des performances, en fonction de la pratique et de l'acquisition de l'habileté, s'accompagne aussi d'une augmentation de la variabilité des mouvements de chacun des membres (Arutyunyan, Gurfinkel & Mirskii, 1968 cités par Newell & Corcos, 1993). Dans cette tâche, la diminution de la variabilité des sorties motrices s'accompagnent d'une augmentation du nombre de degrés de liberté qui sont régulés dans la coordination, cela a été dénommé par Bernstein (1967) le dégel ou la libération des degrés de liberté. Les actions compensatoires des membres tendent à réduire les fluctuations des sorties motrices finales mais de part la même augmentent leur variabilité individuelle. L'implication générale de ce résultat est que la présence de variabilité n'est pas l'expression systématique d'un facteur négatif à l'acquisition d'habileté comme elle est habituellement dépeinte dans la littérature.

Enfin, il est à noter que l'interprétation classique de la variabilité comme étant l'expression du bruit dans le système sans signification particulière est envisagée comme étant du bruit blanc Gaussien non corrélé. Or, cette interprétation théorique se doit d'être basée sur une mesure opérationnelle qui permet d'observer le caractère aléatoire de la variabilité (Newell & Corcos, 1993). La variabilité d'un paramètre donné d'un système ne s'écrit pas nécessairement sous la forme d'une équation de bruit. S'intéresser et donner une interprétation à la variabilité des phénomènes de la cognition et de la motricité requiert l'utilisation de mesure opérationnelle de la variabilité qui reflète le construit théorique. Enfin, certains auteurs suggèrent que l'étude de la variabilité puisse être une source d'informations pour comprendre la nature de l'organisation des comportements plus importante que les invariants (Newell & Corcos, 1993, Slifkin & Newell, 1998). Les nouvelles perspectives

d'études de la variabilité proposées dans la littérature suggèrent principalement de prendre en compte l'évolution dans le temps des comportements et d'utiliser des outils qui permettent l'identification de la structure des fluctuations pour analyser les propriétés des comportements et de la variabilité associée (Slifkin & Newell, 1998). La variabilité est inhérente à tous les systèmes biologiques (Newell & Corcos, 1993 ; Slifkin & Newell, 1998 ; Riley & Turvey, 2002). Une observation simple de cette affirmation est qu'il est impossible de générer deux patrons de mouvements identiques successivement, et ceci dans des conditions de réalisation de la tâche identiques et même pour des experts. Bernstein (1976) notait que la réplication et la répétition de mouvements cycliques menait systématiquement à la production de variabilité et que c'était là une caractéristique saillante des comportements humains, observable à tous les niveaux d'analyses. Quels que soient les phénomènes mesurés, il y a toujours une variabilité résiduelle incompressible dans les performances.

III. 3. Reconsidération conceptuelle de la variabilité

Une part de l'évolution du statut de la variabilité et des invariants dans les sciences cognitives est le fruit de l'évolution des modèles de la cognition et du contrôle de la motricité, qui se réfèrent à de nouveaux cadres conceptuels (Lautrey, Mazoyer et van Geert, 2002). L'introduction des théories des systèmes dynamiques non linéaires et du chaos à l'étude des systèmes biologiques a ouvert de nouvelles voies de conceptualisation de la variabilité (Glass & Mackey, 1988 cités dans Newell & Corcos, 1998). Ces modèles sont une alternative aux modèles à instructions, de nature plus déterministe, dans le domaine de la cognition et de la motricité, fournissant un sens à des phénomènes de variabilité qui n'en avaient guère dans d'autres cadres conceptuels. Plus particulièrement, c'est le rôle reconnu à la variabilité dans les mécanismes adaptatifs et, notamment dans les processus d'auto-organisation, qui en est le principal attrait. Dans cette perspective, la variabilité est une source d'information. De plus,

on observe un nombre grandissant d'études dans la littérature qui analysent systématiquement la structure de la variabilité (Slifkin & Newell, 1998 ; Gilden, 1997, 2001). Un résultat crucial de ces travaux récents est la mise en évidence que la présence de bruit blanc Gaussien est d'avantage un cas particulier qu'une règle (Gilden, Thornton & Mallon, 1995), argument justifiant l'étude de la variabilité dans ces nouvelles analyses.

Dans une série de positions ou de fluctuations d'un paramètre donné, différentes propriétés peuvent être présentes. Lorsque l'on s'intéresse à la structure des fluctuations, il est nécessaire de faire appel à un certain nombre de concepts, relatifs aux propriétés de la distribution. C'est dans cette perspective que Riley et Turvey (2002) définissent ce que sont des processus aléatoires, stochastiques ou déterministes. Une variable (discrète ou continue) se définit en relation à une fonction de probabilité. Une fonction de probabilité est une fonction qui assigne une probabilité à l'apparition de chacune des valeurs possibles que peut prendre la variable. Si cette fonction décrit parfaitement un comportement, la connaissance de la structure ou des propriétés de la fonction renseigne sur les propriétés d'organisation et d'ordre de ce même comportement. On en distingue classiquement trois

a) Pour une fonction purement aléatoire, les états ou les valeurs futures sont parfaitement indépendantes des états ou des valeurs précédent(e)s, c'est-à-dire qu'aucune prédictibilité du comportement ne peut être faite. Ce processus est appelé un processus de bruit blanc. Il est important de noter que la forme pure de bruit blanc (i.e. c'est-à-dire un processus modélisé par une fonction purement aléatoire) est un modèle mathématique, et non un phénomène physique (Morrison, 1991, cité par Riley & Turvey, 2002). En effet, la détermination de la structure ou des propriétés d'une série temporelle d'une variable dépendante est faite sur des ajustements à cette série de différents modèles mathématiques reconnus et identifiés dans la littérature comme représentatifs de catégories de phénomènes variables.

b) Un processus déterministe, quant à lui, est modélisé par une fonction dont la connaissance de quelques états permet de prédire avec une grande précision les états ultérieurs.

c) Enfin, un processus stochastique est un processus dont l'évolution est aussi gouvernée par une fonction de probabilité, mais cette fonction n'est pas purement aléatoire. Le terme de stochastique est employé pour des processus de bruit ou des comportements qui sont influencés simultanément par des processus déterministes et aléatoires. Ainsi, des formes de bruit ont été identifiées, qui sont dénommés suivant un panel de couleur, on parle de bruit coloré, et qui rendent compte de la proportion variée des composantes déterministe et aléatoire. De manière générale, on oppose les processus aléatoires aux processus déterministes et entre ces deux types de processus il existe une sorte de continuum de processus, basé sur le degré d'influence des processus déterministe et aléatoire simultanément à l'œuvre.

L'analyse de la structure des variations des performances dans les études de la cognition et du contrôle de la motricité se révèle cruciale (pour une revue : Slifkin & Newell, 1998 ; Newell & Morrison, 2000 ; Riley & Turvey, 2002 ; Gilden, 1997, 2001 ; Gilden, Thornton & Mallon, 1995 ; Yamada, 1995). Elle met en évidence que les fluctuations sont le plus souvent structurées, ce qui tend ainsi à discréditer l'interprétation traditionnelle faite. De plus, parmi les propriétés que peut présenter la distribution des fluctuations biologiques, certaines sont statistiquement plus ou moins fréquentes. Ainsi, le bruit blanc ou le bruit brun sont rares (nous ne détaillons pas les propriétés des distributions de ces bruits, pour une revue voir Gilden, 2001), tandis que le bruit rose ou encore appelé $1/f$ a été mis en évidence pour des fluctuations temporelles de systèmes physiques et biologiques extrêmement divers (Press, 1978 ; Gilden, 1997). Au travers de différentes études reprenant des paradigmes majeurs de la psychologie, Gilden (1997, 2001) met en évidence que les patrons des fluctuations des performances mesurant la rapidité de jugements d'intervalles spatiaux et temporels,

l'exactitude et la production de discrimination et de choix, présentent une unique structure corrélacionnelle de bruit 1/f. Il émet l'hypothèse que la présence de ce bruit dans les données psychologiques pourrait être associée à des aspects des processus cognitifs les plus élémentaires, comme par exemple la formation de représentations. Gilden et ses collaborateurs s'inscrivent dans les théories des systèmes complexes pour l'interprétation de ce phénomène, et voient dans la mise en évidence de la présence du bruit 1/f dans l'activité cognitive humaine la signature de dynamiques complexes. L'universalité du bruit 1/f laisse penser qu'il n'est pas le produit d'interactions physiques particulières mais au contraire une manifestation générale des système complexes. Dans le travail de Gilden sur l'évolution temporelle de l'activité cognitive, le bruit 1/f est un processus de mémoire. L'auteur s'attache à démontrer que c'est une « sorte » de mémoire qui résulte de la dynamique des systèmes (Beran, 1994 cité dans Gilden, 2001), c'est-à-dire que les corrélations séquentielles particulières sont un produit du fonctionnement de la mémoire. Plus précisément, le bruit 1/f est considéré comme la conséquence de la dynamique intrinsèque associée à la formation des représentations.

Le fait que la cognition génère une signature dynamique comme une conséquence de sa propre activité motive des perspectives d'études sur les propriétés des fluctuations des comportements. Toutefois, ces perspectives nécessitent l'élaboration de plans expérimentaux permettant l'observation des fluctuations et l'utilisation d'outils statistiques en mesure de renseigner et/ou d'identifier la structure des fluctuations. Or, l'étude de la nature de la structure des fluctuations d'un comportement dans le temps n'est pas sans conséquences dans la mise en œuvre d'études empiriques.

III. 4. Conséquences méthodologiques liées à l'étude de la variabilité

La prise en compte de la variabilité a des conséquences à un niveau méthodologique et sur l'utilisation des outils statistiques. Le problème réside dans la mise en œuvre de plans expérimentaux et l'analyse permettant d'observer et de traiter la variabilité de manière significative et informative.

Pour certains auteurs, c'est en partie l'utilisation massive des méthodes visant à la recherche de tendances centrales et d'invariants qui a contribué à l'absence de réflexion faite autour de la variabilité. Mais dès lors que l'on est dans une perspective théorique où la variabilité n'est plus considérée comme une constante de bruit, il est nécessaire de pouvoir en observer directement les changements au cours du temps (dans l'amplitude de la mesure, comme dans sa structure), en fonction des conditions environnementales, et de manière individuelle (l'étude de la variabilité moyenne n'ayant plus de sens). L'idée que la variabilité devrait être en mesure de renseigner à la fois sur les propriétés de l'organisme et de l'environnement provient de l'idée que les modifications de l'environnement impliquent nécessairement des adaptations, qui s'exprimeront en partie dans des fluctuations du comportement (Lautrey, Mazoyer & van Geert, 2002).

Ces perspectives d'études sont en rupture avec les démarches classiques, car se donner les moyens d'étudier l'organisation des fluctuations dans le temps nécessite l'abandon des statistiques inférentielles les plus courantes. L'idée que la structure des fluctuations rend compte de l'adaptabilité du système va à l'encontre d'un axiome de base de la théorie des probabilités sur lequel repose la majorité des outils et des tests statistiques communément utilisés : l'indépendance conditionnelle (Spray & Newell, 1986 ; van Geert, 2002). L'indépendance conditionnelle implique qu'un événement futur probable ne dépend pas d'un événement passé. Or, chez un organisme adaptatif capable d'apprentissage ou de mémorisation, une action future est, dans une certaine mesure, toujours conditionnée par ses

actions et événements passés. Les effets de l'apprentissage et de la mémoire s'inscrivent dans les modifications des comportements dans le temps et dans la répétition des essais. Paul van Geert (2002) suggère que l'une des raisons pour lesquelles les dépendances dans le temps des actions successives n'ont pas été étudiées est que l'expression des fonctions d'apprentissage et de mémoire dans le temps défie le principe d'indépendance conditionnelle. Ainsi, les procédures statistiques les plus communément utilisées non seulement ne permettent pas l'observation mais surtout ne tolèrent pas l'existence de ces structures dans les données.

C'est vers des plans expérimentaux dits en séries temporelles et vers les outils de modélisation que ce sont orientées les recherches visant à étudier la structure et/ou à observer dans le temps l'évolution d'un comportement soumis à des situations d'apprentissage ou de mémorisation.

Une série temporelle est une collection d'observations ou de réponses considérées séquentiellement qui présente les propriétés suivantes : les observations sont ordonnées au cours du temps, le comportement à un moment est affecté par le comportement à l'instant précédent, et les comportements futurs sont déterminés à la fois par les observations passées et présentes (Chatfield, 1975). Par conséquent, l'utilisation de séries temporelles suggère que les essais ne sont plus un facteur aléatoire mais au contraire qu'il existe une structure sous-jacente qui relie les essais entre eux, encore appelée relation inter-essais.

L'introduction, il y a quelques années, de l'analyse en série temporelle dans des études du comportement humain nous offre des exemples d'applications et des éléments de réponses sur les informations que procurent ces outils (Blackwell, Simmons & Spray, 1991 ; Zalewski, Smith, Hart, Schot, & Endejan, 1999 ; Bradeley, Peterson & Leckman, 1998 ; Spray & Newell, 1986 ; Fortes, Delignières et Ninot, sous presse). Spray et Newell (1986) utilisent les modèles d'analyse de séries temporelles discrètes dans l'étude de l'apprentissage moteur et

concluent que cette analyse fournit un très bon moyen de générer des modèles qui décrivent et expliquent les comportements moteurs observés (Blackwell, Simmons & Spray, 1991, Spray & Newell, 1986). Ces recherches suggèrent que ces modèles offrent des éléments de réponses sur la nature et les propriétés des processus qui ont produit les comportements. Elles utilisent les modèles ARIMA (Box & Jenkins, 1976) qui semblent être appropriés à l'étude de séries temporelles discrètes de mesures comportementales. On retrouve l'utilisation de ces modèles pour des séries temporelles de données psychologiques variées telles que l'évolution de l'estime de soi (Delignières, Fortes & Ninot, 2004 ; Fortes, Delignières et Ninot, sous presse), l'intervalle de temps entre deux manifestations du syndrome de Gilles de la Tourette (Bradeley, Peterson & Leckman, 1998), l'erreur de mouvement dans une tâche motrice de déplacement d'un curseur (Spray & Newell, 1986), le temps de mouvement à l'exécution d'un séquence de mouvements (Blackwell, Simmons & Spray, 1991), le temps de réponse dans une tâche de Stroop (Zalewski, Smith, Hart, Schot, Endejan, 1999). Convaincu de l'apport permis par cet outil, nous utiliserons les modèles ARIMA dans nos travaux. La partie à venir présente en détail cet outil.

III. 5. Conclusion

Les travaux qui étudient la variabilité mettent en avant i) les limites voire les erreurs de l'opérationnalisation et de la conceptualisation classique de la variabilité, ii) la nécessité lorsque l'on étudie un processus en œuvre de l'analyser au travers des relations « de dépendance » ou « déterministes » qui s'installent dans le temps comme la conséquence de son activité, iii) que les fluctuations loin d'empêcher la généralisation sont informatives lorsqu'elles sont analysées avec des outils appropriés, iiiii) enfin, que les quelques travaux cités modélisant les séries temporelles à l'aide des modèles ARIMA concluent en faveur de l'intérêt de l'outil et de l'analyse permise.

IV. Les modèles ARIMA de Box et Jenkins (1976)

Une alternative aux analyses statistiques classiques dans l'étude de la mémorisation et de l'apprentissage est l'analyse en séries temporelles, c'est à dire l'analyse de l'évolution des performances dans le temps. Les modèles ARIMA de Box et Jenkins (1976) offrent un outil d'analyse des séries temporelles très accessible aussi bien au niveau des contraintes méthodologiques (comparés à d'autres outils les modèles ARIMA peuvent modéliser des séries temporelles très courtes, de l'ordre de 30 points), qu'au niveau des modèles mathématiques qui sont utilisés qui sont des équations stochastiques linéaires relativement simples. Cette technique d'analyse est essentiellement utilisée à des fins de prévision, et pour l'étude de la structure elle-même des séries temporelles. Pour notre part, c'est dans la perspective de modéliser le comportement de la série temporelle, d'identifier sa structure que nous faisons appel à ces modèles. Pour autant, leur utilisation en psychologie est encore rare, pour deux raisons méthodologiques : la nécessité de recueillir un minimum de 30 valeurs à des intervalles de temps équidistants, et la difficulté de l'identification des modèles ARIMA (Arnau & Bono, 2001).

L'analyse des séries temporelles repose sur trois étapes : l'identification, l'estimation et la vérification. ARIMA est un acronyme de *autoregressive integrated moving-average*. La nature d'un modèle ARIMA s'exprime en fonction de la notation $ARIMA(p, d, q)$ où p est l'ordre du terme autorégressif, d est l'ordre du terme de différenciation, et q l'ordre du terme de moyenne mobile. Si aucun terme de différenciation n'est appliqué ($d = 0$), on retrouve les modèles sous l'appellation de modèles $ARMA(p,q)$. La première étape de l'analyse consiste à identifier le modèle qui pourrait générer la série temporelle étudiée, en d'autres termes à

définir l'ordre des 3 termes, i.e. le nombre de termes autorégressifs, de différenciation et/ou de moyenne mobile présents dans l'équation qui s'ajuste au mieux à la série.

IV. 1. Identification et estimation des modèles

L'identification de la structure d'une série temporelle débute par l'analyse de sa stationnarité. Il est nécessaire d'observer la stationnarité de la moyenne et / ou de la variance pour pouvoir détecter ensuite la présence de termes autorégressif AR ou de moyenne mobile MA. Cela signifie que la série ne doit pas présenter de tendance à l'accroissement et / ou à la diminution.

La non-stationnarité d'une série temporelle s'observe sur la représentation graphique de la série, au travers de l'observation d'une tendance et sur le patron de la fonction d'autocorrélations (ACF) (cf. figure 1).

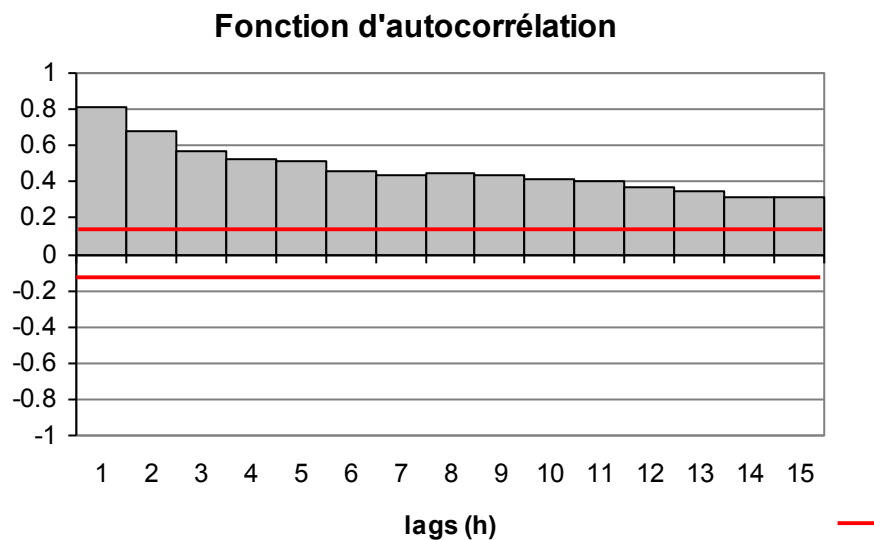


Figure 1 : Représentation graphique d'une ACF, avec les lags (h) sur l'axe des abscisse et les valeurs des autocorrélations sur l'axe des ordonnées.

Le patron de la fonction d'autocorrélation d'une série non-stationnaire présente des pics significatifs *homogènes* sur un nombre de décalages élevé (les décalages sont appelés *lag* cf. figure 1). A l'inverse le patron de la fonction d'autocorrélation d'une série stationnaire ne présente que quelques pics significatifs qui décroissent rapidement vers une valeur nulle en fonction de l'accroissement des décalages.

Lorsque la série n'est pas stationnaire, elle est transformée jusqu'à ce que l'on observe sa stationnarité. Différentes méthodes existent, Box et Jenkins (1976) proposent dans leur modèle de remplacer la série originale par la série des différences des point adjacents. Cette série différenciée sera ensuite intégrée pour revenir à la série originale : c'est pourquoi le modèle final contient le cas échéant des termes d'intégration.

L'application d'une différenciation sur la série joue le rôle d'un filtre linéaire en éliminant la tendance. La suppression de la tendance s'observe au travers de l'étude de la représentation graphique et de l'ACF de la série différenciée, encore appelée $D(1)$ (cf. figure 2). L'application éventuelle d'un second terme de différenciation permet de supprimer une tendance quadratique. L'analyse se poursuit sur la série différenciée c'est-à-dire $D(1)$, ou $D(2)$ si une seconde différenciation a été appliquée.

Une fois la stationnarité observée, l'analyse consiste à déterminer les ordres des termes autorégressif AR et de moyenne mobile MA les plus satisfaisants pour représenter la série.

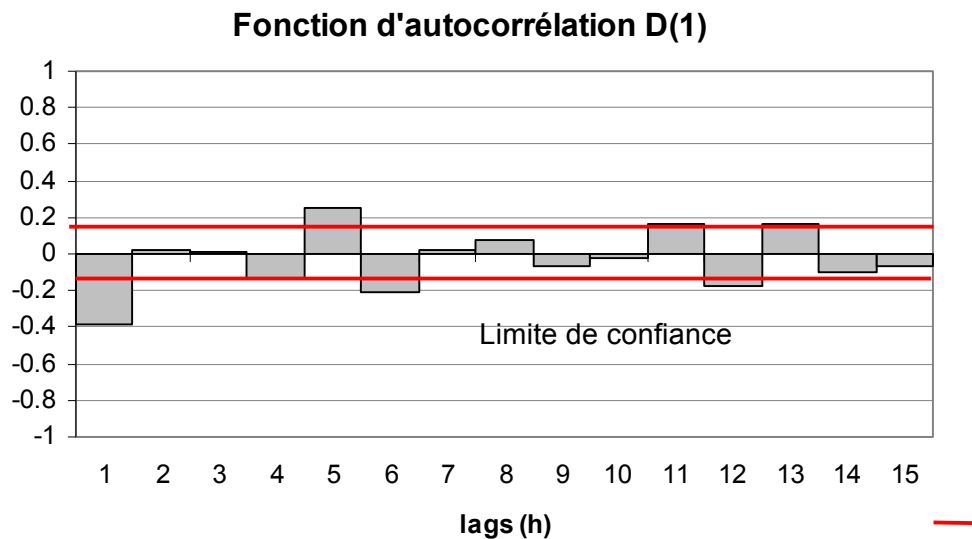


Figure 2 : Représentation graphique de la fonction d'autocorrélation de la série différenciée $D(1)$.

Les fonctions d'autocorrélation (ACF) et d'autocorrélation partielle (PACF) sont les outils principaux de la détermination des termes ARMA. La présence dans les ACF et PACF de pics significatifs signifie qu'il existe une relation déterministe inter-essais. Les patrons des ACF et des PACF renseignent sur la nature de la relation inter-essais (autorégressive ou de moyenne mobile) et sur l'étendue de cette relation.

L'ACF met en évidence le degré de corrélation de la série avec elle-même en fonction de l'accroissement du décalage (lag h) à pas de 1. Son observation est essentielle pour la détermination de la stationnarité et de l'ordre du processus lorsque sa nature est de moyenne mobile MA.

La PACF met en évidence le degré de corrélation entre deux valeurs, « espacées » d'un décalage (lag h) alors que les valeurs intermédiaires sont contrôlées. La PACF, de manière inverse à l'ACF, est essentielle pour déterminer l'ordre (l'étendue) d'un processus autorégressif AR.

En l'absence de toute autocorrélation et autocorrélation partielle significative (cf. figure 3), la série est modélisée par un processus ou un modèle de bruit blanc, ARIMA(0,0,0). Un modèle de bruit blanc est un processus stochastique, statistiquement stationnaire où les valeurs ne présentent aucune corrélation significative entre elles. Le processus de bruit blanc le plus connu est le bruit blanc gaussien qui présente une caractéristique supplémentaire : les valeurs sont indépendantes et identiquement distribuées (iid) autour de sa moyenne = 0 et avec une variance σ_ε^2 de 1 . Ce dernier est aussi appelé variable aléatoire ou processus aléatoire. Si l'ensemble des séries temporelles d'une étude présente les propriétés d'un processus de bruit blanc, alors une analyse statistique de type analyse de variance sera plus à même de fournir des informations sur les données.

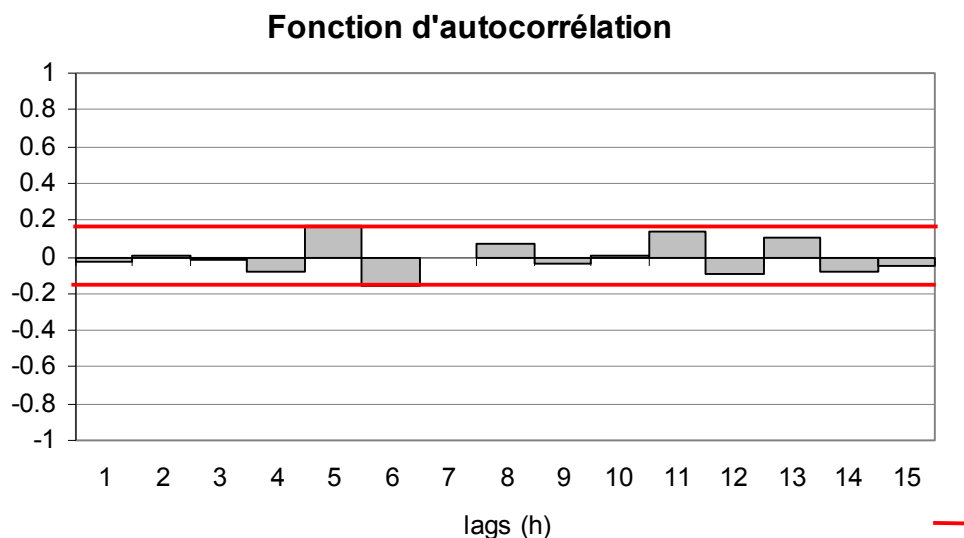


Figure 3 : Représentation graphique d'une ACF représentative d'un modèle de Bruit Blanc ARIMA (0, 0, 0)

Les indications très ciblées que fournissent les ACF et les PACF permettent de parler de signature caractéristique ou théorique d'un modèle autorégressif ou de moyenne mobile. La signature caractéristique d'un processus de moyenne mobile d'ordre q , MA(q), est une

ACF présentant des valeurs proches de zéro ($\phi_h = 0$) pour tous les décalage $h > q$. La PACF associée présente une décroissance graduelle vers zéro en fonction des décalages.

La signature caractéristique d'un processus autorégressif d'ordre p , $AR(p)$, est une ACF qui présente une décroissance graduelle vers zéro en fonction du décalage, associée à une PACF dont les valeurs sont proches de zéro, $\phi_{hh} = 0$, pour tous les décalages (lags) $h > p$.

Pour résumer, pour un modèle de moyenne mobile à un terme $MA(1)$, seule la première valeur de l'ACF est significative et pour un modèle autorégressif d'ordre un $AR(1)$ seule la première valeur de la PACF est significative.

L'intervalle de confiance de l'ACF est égal à $\pm 1.96/\sqrt{N}$ ou N est le nombre d'observations. Ces limites de l'intervalle de confiance sont représentées par des lignes horizontales sur le graphe des ACF et représentent les limites de confiance à .05 des autocorrélations d'un processus de bruit blanc, au-delà, statistiquement, ce n'est plus un processus de bruit blanc. De manière équivalente l'intervalle de confiance d'un processus de bruit blanc est représenté sur la PACF.

L'estimation des paramètres autorégressifs $AR(p)$ et de moyenne mobile $MA(q)$ est faite par une méthode non linéaire de l'estimation des maximums de vraisemblance (*maximum likelihood estimator*). Ce calcul est réalisé en fonction des ordres des paramètres donnés à l'issue de la phase d'identification.

IV. 2. Les modèles Autorégressifs $AR(p)$

Un modèle autorégressif suggère que les valeurs de la série y_t s'expriment en fonction des p précédentes valeurs, $y_{t-1}, y_{t-2}, \dots, y_{t-p}$.

Un modèle autorégressif $AR(p)$ répond à l'équation suivante ;

$$y_t = \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \dots + \phi_p y_{t-p} + \varepsilon_t,$$

ou

$\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$, sont les coefficients autorégressifs,

$y_{t-1}, y_{t-2}, \dots, y_{t-p}$, sont les p valeurs précédentes nécessaire à la modélisation de la série

ε_t , est une variable aléatoire qui entache la valeur à chaque temps t

Un modèle AR(p) est une fonction linéaire d'une portion des essais précédents et d'une erreur aléatoire qui entache l'essai au temps t .

Par simplicité, la moyenne de la série d'un modèle AR(p) est donnée égale à 0. Si celle-ci est différente de zéro, μ , alors on remplace y_t par $y_t - \mu$, ce qui donne,

$$y_t = \alpha + \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \dots + \phi_p y_{t-p} + \varepsilon_t,$$

ou

α est une constante,

$$\alpha = \mu(1 - \phi_1 - \phi_2 - \dots - \phi_p).$$

Un processus autorégressif à un terme AR(1) s'écrit:

$$y_t = \phi_1 y_{t-1} + \varepsilon_t,$$

ou,

y_t est une série stationnaire,

ϕ_1 est le coefficient autorégressif,

ε_t est un terme de la variable aléatoire

de manière similaire un processus AR(2) s'écrit

$$y_t = \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \varepsilon_t$$

Un processus AR peut être associé à un ou des termes d'intégration, si la série a dû être différenciée dans un premier temps afin de la stationnariser. Un modèle autorégressif à un terme d'intégration ARIMA(1,1,0) s'écrit :

$$y_t - y_{t-1} = \alpha + \phi(y_{t-1} - y_{t-2}) + \varepsilon_t.$$

$$y_t = \alpha + (1+\phi)y_{t-1} - \phi y_{t-2} + \varepsilon_t.$$

IV. 3. Les Modèles de Moyenne Mobile MA(q)

Un modèle de moyenne mobile MA(q) suggère que les valeurs de la série y_t s'expriment par fonction d'une combinaison linéaire de l'erreur aléatoire qui a entaché les q essais précédents.

Un modèle MA(q) répond à l'équation suivante :

$$y_t = \alpha - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} + \varepsilon_t,$$

ou,

$\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ sont les paramètres de moyenne mobile

$\varepsilon_{t-1}, \varepsilon_{t-2}, \dots, \varepsilon_{t-q}$, sont les q valeurs d'erreurs précédentes

ε_t est un terme d'erreur aléatoire qui entache l'essai au temps t

α est une constante qui représente la moyenne de la série.

Un modèle de moyenne mobile à un terme MA(1) répond à l'équation :

$$y_t = \alpha - \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \varepsilon_t$$

De manière similaire, un modèle de moyenne mobile à 2 termes MA(2) s'écrit

$$y_t = \alpha - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} + \varepsilon_t$$

Un processus MA peut être associé à un ou des termes d'intégration, si la série a dû être différenciée dans un premier temps afin de la stationnariser. Un modèle de moyenne mobile à un terme d'intégration ARIMA (0,1,1) obéit à l'équation :

$$y_t = \alpha + y_{(t-1)} - \theta \varepsilon_{(t-1)} + \varepsilon_t$$

Lorsque la constante n'est pas significativement différente de zéro, le modèle est équivalent au modèle de lissage exponentiel (simple exponential smoothing), ou le paramètre θ est appelé la constante de lissage :

$$y_t = y_{t-1} - \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \varepsilon_t$$

IV. 4. La vérification des modèles

Une fois la nature des termes ARIMA définis, il faut procéder à la vérification du modèle obtenu, c'est-à-dire vérifier que ce modèle reproduise le processus générant la série temporelle. La vérification se base essentiellement sur l'étude des résidus, à savoir si la série des résidus présente de l'information additionnelle qui n'a pas été prise en compte par le modèle.

Si le modèle est bien ajusté à la série originale, alors la série des résidus se comporte comme un processus de bruit blanc. C'est à nouveau l'étude des ACF et des PACF de la série des résidus qui permet en premier lieu d'observer l'ajustement. Associé à l'observation des ACF et des PACF, on fait appel au test statistique de Ljung-Box ou « test portemanteau ». Ce test, au travers de la statistique Q, fournit un indice de la significativité ou de la non significativité des ACF et des PACF, elle est plus précise que la seule lecture du graphe et est le principal indice utilisé pour accepter ou rejeter un modèle.

Enfin, d'autres indices sont disponibles, notamment lorsqu'il faut choisir entre plusieurs modèles qui présentent le même niveau d'ajustement à la série à l'issue de l'étude des résidus. La première règle est l'application du principe de parcimonie, principe selon

lequel de deux hypothèses ou de deux solutions également plausibles, il faut toujours choisir la plus simple.

PARTIE EXPERIMENTALE

I. Modélisation de la dynamique de mémorisation

L'objectif de cette étude est d'analyser et de modéliser la dynamique de la mémorisation d'une séquence de mouvements morphocinétiques.

Le rappel d'une séquence de mouvements morphocinétiques alors que le modèle n'est plus présent perceptivement, nécessite la construction d'une représentation ou d'une référence interne pour guider l'action (Bandura, 1986 ; Cadopi, 1994). La présentation répétée d'un modèle a pour effet d'engendrer un processus automatique et non conscient de réorganisation des informations (Thorndyke & Hayes-Roth, 1982). Cette réorganisation du contenu de la représentation serait à l'origine de l'amélioration des performances de rappel en direction du modèle.

Ce résultat a été observé par Giraudo et Pailhous (1999) dans le cadre de la mémorisation d'une carte visuo-spatiale. Ces auteurs dénomment le processus par lequel les rappels s'approchent de la cible le processus de migration. Ce processus de migration s'observe au travers de l'évolution d'une mesure macroscopique appelée « Exactitude des rappels » qui rend compte de la distance moyenne qui sépare un rappel de la cible.

L'étude de l'évolution de l'exactitude des rappels met en évidence que les premiers rappels sont éloignés de la cible, puis avec la présentation répétée de la cible, ils deviennent plus exacts et se stabilisent près de la cible, sans pour autant l'atteindre. Cet état de stabilité des performances de rappel près de la cible se caractérise par l'absence d'apprentissage et / ou d'oubli, et est assimilé à un « état de connaissance ». Même si cet état est stable, les rappels ne sont jamais tout à fait exacts et restent variables. Ce dernier résultat avait déjà été mis en évidence dans le cadre de reproduction sérielle d'histoires et de figures abstraites et géométriques (Bartlett, 1932, Zangwil, 1937).

Giraudo et Pailhous (1999) ont mis en évidence qu'un second processus était simultanément à l'œuvre lors de la mémorisation d'une configuration de points. Ce processus, appelé « de structuration », s'observe au travers de la mesure de la variabilité des rappels, c'est-à-dire au travers de la distance moyenne qui sépare deux rappels successifs. L'évolution de cette mesure rend compte du niveau de structuration de l'image ou de la représentation en mémoire. Lors des premiers rappels la variabilité est importante, puis diminue et se stabilise à un seuil pour lequel les rappels ne peuvent être moins variables. Ce seuil est assimilé au niveau de résolution maximale de l'image en mémoire, à une variabilité irréductible.

Enfin, les auteurs ont mis en évidence que l'arrêt de la présentation du modèle, à l'issue du processus de migration et de structuration, n'engendre aucune modification des performances des rappels. Ce résultat suggère que l'image est fortement structurée en mémoire.

Nous avons repris le protocole en reproduction sérielle mis en place par Giraudo et Pailhous (1999), afin d'observer l'activité de mémorisation et de modéliser la structure des séries temporelles de l'exactitude.

Notre objectif au niveau de la modélisation de la série temporelle de l'exactitude (processus de migration) était de mettre en évidence une relation déterministe inter-essais, qui rendrait compte du construit progressif de la représentation visuo-motrice.

Dans la tâche de reproduction, il est attendu que les rappels sont principalement déterminés par le contenu de la représentation, par conséquent l'évolution des performances de rappels devrait rendre compte de l'évolution du contenu de la représentation en mémoire.

Plus précisément, la présentation du modèle devrait mettre en œuvre un processus de migration, envisagé comme un processus de construction et / ou de réorganisation d'informations dans la représentation. Ce processus à l'œuvre devrait s'exprimer au travers d'une relation déterministe entre les rappels. On fait l'hypothèse que le contenu de la

représentation est modifié sur la base de ce qui a été rappelé précédemment et en fonction de la nouvelle observation du modèle. Si le processus de migration fonctionne sur ce principe, c'est-à-dire en fonction de ce qui a été fait, alors la performance au temps t est une fonction des performances aux temps précédents.

I. 1. Méthode

✓ Sujets

Douze jeunes filles, âgées de 18 à 23, ans ont participé à cette expérience. Elles sont droitières et pratiquent au minimum une activité de danse (jazz, classique, modern jazz, contemporain, claquette, afro, ...) sans présenter un niveau d'expertise.

✓ But de la tâche

Le but de la tâche est de reproduire de mémoire (i.e. en l'absence du modèle), le plus précisément possible une séquence de mouvements du bras droit. Les consignes qui étaient données aux sujets sont présentées en Annexe 1.

✓ Matériels

Le modèle : La séquence de mouvements « modèle », que nous appelons la cible, a été créée et enregistrée sur deux formats : un enregistrement sur vidéo VHS a été fait pour présenter la cible visuellement sur un écran de démonstration placé à deux mètres en face des sujets, et un enregistrement de la cinématique du bras du sujet « cible » (Annexe X) qui sert à l'analyse des rappels des sujets.

La séquence de mouvements est présentée au travers de 24 photos, représentant des positions significantes.

Le système d'enregistrement: La performance du sujet modèle et les rappels sont enregistrés à l'aide d'un système d'analyse du mouvement VICON 370 (Biometrics). Quatre caméras à infrarouge sont disposées en 1/3 de cercle à une distance de 3,5 mètres devant le sujet. La fréquence d'acquisition des caméras est de 50 Hz. Les caméras enregistrent le déplacement d'un marqueur externe placé sur l'extrémité du troisième doigt de la main droite.
(Photos)

✓ Procédure

Une fois le but de la tâche énoncé, la cible est présentée deux fois de suite au sujet en guise de familiarisation. Pendant la familiarisation les sujets restent immobiles.

A partir de la troisième présentation, les sujets rappellent la cible après l'avoir observée.

Deux conditions de passations sont mises en place, les sujets sont répartis aléatoirement dans les deux groupes (P1 et P2). Les deux groupes rappellent la séquence 60 fois.

Les sujets du premier groupe (P1) ont une présentation de la cible pour les 60 essais, les sujets du deuxième groupe (P2) ont une présentation de la cible pour les 30 premiers essais seulement.

✓ Traitement des données

Le traitement et l'analyse se portent sur les données du déplacement du doigt sur l'axe vertical (cf. figure 4).

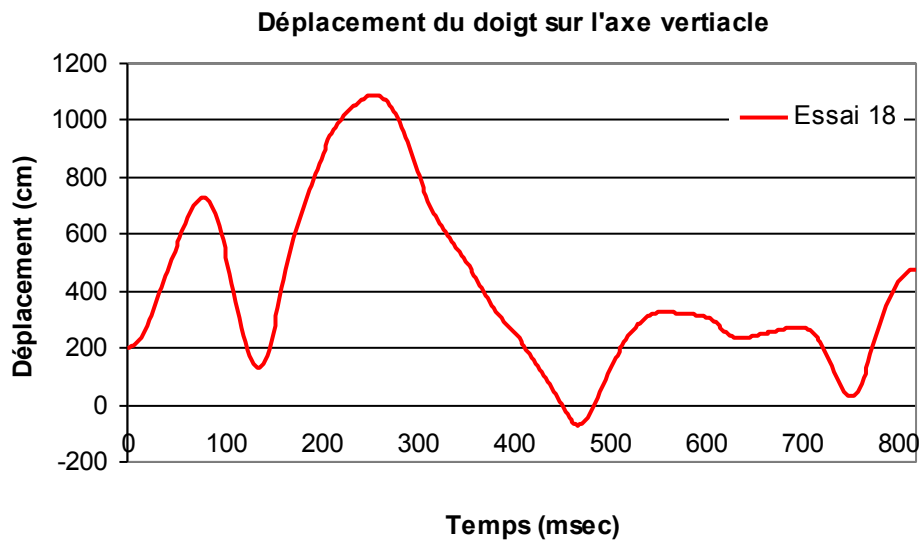


Figure 4 : Représentation graphique du déplacement du doigt sur l'axe vertical

Ces données du déplacement du doigt dans la hauteur ont été lissées, afin d'éliminer les artéfacts non représentatifs, à l'aide d'une transformée inverse de Fourier. La fréquence de coupure correspondait aux 9/10ème des fréquences du spectre.

Les séries cinématiques lissées ont été ensuite normalisées dans le temps sur 300 données quelle que soit la durée du rappel, et dans la hauteur de déplacement, en réécalonnant les points entre 0 (pour le point le plus bas) et 100 (pour le point le plus haut) (cf. figure 5).

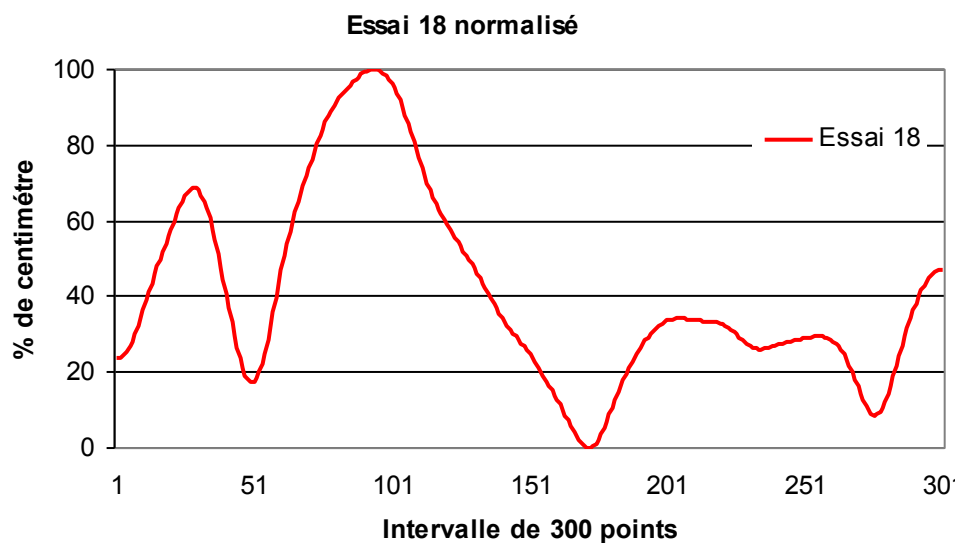


Figure 5 : Série du déplacement du doigt lissée et normalisée

Cette normalisation en amplitude et en temps conserve les rapports spatio-temporels des séries cinématiques originales et permet de comparer les rappels (lissés et normalisés) entre eux et avec la cible, dont la série cinématique du déplacement du doigt a subi les mêmes traitements (cf. figure 6).

La mesure de l'exactitude des rappels est obtenue grâce à la comparaison de chaque rappel à la cible. Plus précisément, la mesure de l'exactitude correspond à la moyenne des différences en valeur absolue des 300 points d'un essai avec les 300 points du modèle (*Root mean square error*).

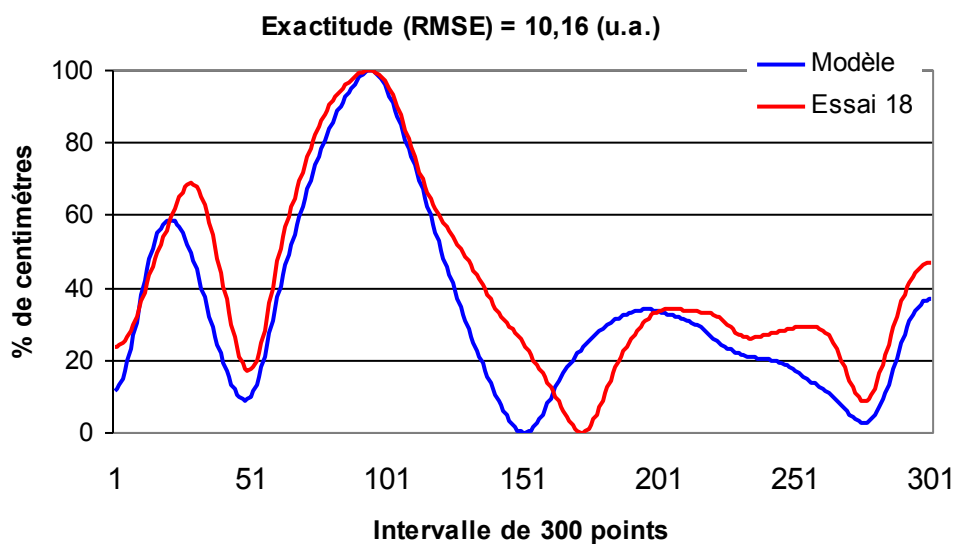


Figure 6 : L'indice de l'exactitude est la moyenne des différences en valeur absolue des 300 points d'un essai avec les 300 points du modèle

Les séries temporelles de l'exactitude sont constituées des 60 valeurs d'exactitude obtenues pour les 60 essais. Trois séries temporelles sont présentées dans la figure 7.

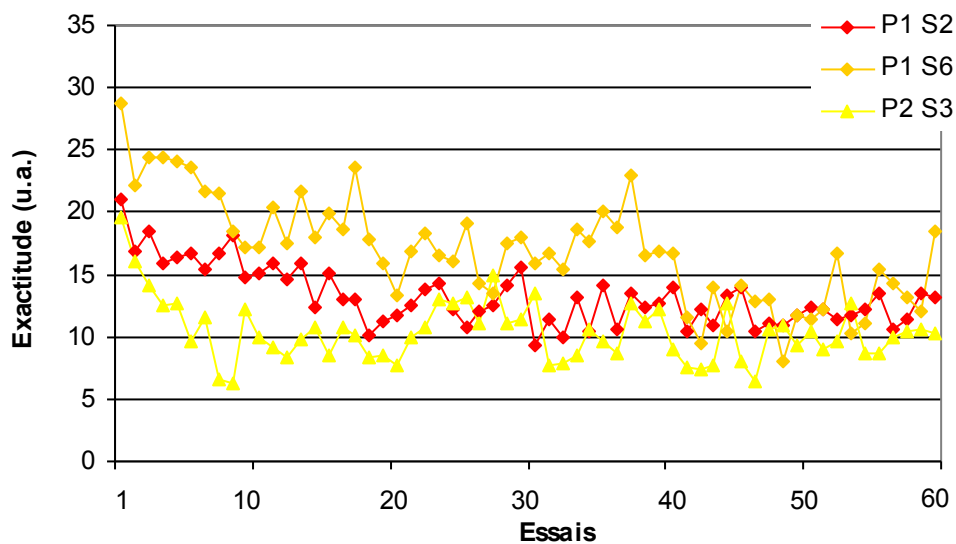


Figure 7 : Trois séries temporelles représentatives des sujets des groupes P1 et P2

✓ Analyse des données

Les séries temporelles de l'exactitude sont analysées à l'aide des modèles ARIMA (Box & Jenkins, 1976) à l'aide du logiciel Statistica (Statsoft[®]). Nous avons procédé à l'analyse :

- des séries temporelles des 30 premiers essais et des 30 derniers
- de séries composées de 30 points décalées avec un pas de 10 (fenêtres), afin d'observer l'évolution de la structure des séries.

I. 2. Résultats

I. 2. 1. Les 30 premiers essais

Les séries temporelles des 30 premières valeurs de l'exactitude pour les deux groupes répondent à un modèle ARIMA auto-régressif à un terme, AR(1) ou ARIMA (1,0,0), qui obéit à l'équation de prédiction :

$$y_t = \alpha + \phi y_{t-1} + \varepsilon_t,$$

équation (1)

dans laquelle

ϕ est le coefficient autorégressif,

α est une constante,

ε_t est une fonction aléatoire de bruit blanc.

Ce processus AR(1) est identifié par une décroissance exponentielle de l'ACF et par la présence d'une seule valeur significative au premier décalage (lag = 1) dans la PACF.

7 sujets répondent à l'équation (1) sans constante, les 5 autres obtiennent un meilleur ajustement avec une constante (cf. tableau 1 et 2).

P1	1.30	31.60
S1	$Y_t = 0,906 Y_{t-1} + \varepsilon_t$	$Y_t = 10.057 + \varepsilon_t$
S2	$Y_t = 0.976 Y_{t-1} + \varepsilon_t$	$Y_t = 11.949 + \varepsilon_t$
S3	$Y_t = 9.076 + 0.585 Y_{t-1} + \varepsilon_t$	$Y_t = 7.176 + \varepsilon_t$
S4	$Y_t = 11.213 + 0.356 Y_{t-1} + \varepsilon_t$	$Y_t = 0.945 Y_{t-1} + \varepsilon_t$
S5	$Y_t = 17.113 + 0.539 Y_{t-1} + \varepsilon_t$	$Y_t = 12.377 + \varepsilon_t$
S6	$Y_t = 0.967 Y_{t-1} + \varepsilon_t$	$Y_t = 0.982 Y_{t-1} + \varepsilon_t$
P2	1.30	31.60
S1	$Y_t = 0.940 Y_{t-1} + \varepsilon_t$	$Y_t = 10.105 + \varepsilon_t$
S2	$Y_t = 0.977 Y_{t-1} + \varepsilon_t$	$Y_t = 10.672 + \varepsilon_t$
S3	$Y_t = 0.945 Y_{t-1} + \varepsilon_t$	$Y_t = 9.756 + \varepsilon_t$
S4	$Y_t = 15.623 + 0.459 Y_{t-1} + \varepsilon_t$	$Y_t = 15.178 + \varepsilon_t$
S5	$Y_t = 12.730 + 0.722 Y_{t-1} + \varepsilon_t$	$Y_t = 10.667 + \varepsilon_t$
S6	$Y_t = 0.954 Y_{t-1} + \varepsilon_t$	$Y_t = 9.429 + \varepsilon_t$

Tableau 1 : Les équations des modèles des séries temporelles de l'exactitude des 30 premiers et des 30 derniers essais du groupe P1 et P2

P1	1.30	31.60
S1	AR(1)	BB
S2	AR(1)	BB
S3	AR(1) + cste	BB
S4	AR(1) + cste	AR(1)
S5	AR(1) + cste	BB
S6	AR(1)	AR(1)
P2	1.30	31.60
S1	AR(1)	BB
S2	AR(1)	BB
S3	AR(1)	BB
S4	AR(1) + cste	BB
S5	AR(1) + cste	BB
S6	AR(1)	BB

Tableau 2 : Les modèles ARIMA obtenus pour les séries temporelles des 30 premiers et des 30 derniers essais pour le groupe P1 et P2

1. 2. 2. Les 30 derniers essais

Les séries temporelles de l'exactitude pour les 30 derniers essais ne présentent plus de valeur significative dans les ACF et PACF, et sont modélisées par un modèle de bruit blanc ou ARIMA (0,0,0). Seul deux sujets du groupe 1 répondent à un modèle AR(1).

Les séries temporelles de 10 sujets répondent à l'équation suivante :

$$y_t = \mu + \varepsilon_t, \quad \text{équation (2)}$$

dans laquelle

μ est une constante, la moyenne de la série, et

ε_t est une fonction aléatoire de bruit blanc.

Les valeurs des constantes des 10 sujets et des termes AR des deux sujets sont présentées dans le tableau X.

I. 2. 3. Evolution de la structure des séries temporelles

La modélisation des séries temporelles de 30 valeurs décalées tout les 10 essais permet d'avoir une approximation du moment de transition entre la structure autorégressive et la structure de bruit blanc.

L'étude des séries de l'exactitude décalées de 10 essais met en évidence que la structure autorégressive AR(1) est présente essentiellement lors des 30 premiers points (cf. Tableau 3). On note que les deux sujets qui présentent un modèles AR(1) pour les 30 derniers essais ; présentent une structure de BB pour les séries temporelles des points 11 à 40, équivalent au premier décalage.

P1	1.30	11.40	21.50	31.60
S1	AR(1)	AR(1) + cste	BB	BB
S2	AR(1)	BB	BB	BB
S3	AR(1) + cste	BB	BB	BB
S4	AR(1) + cste	BB	AR(1) + cste	AR(1)
S5	AR(1) + cste	BB	BB	BB
S6	AR(1)	BB	AR(1)	AR(1)
P2	1.30	11.40	21.50	31.60
S1	AR(1)	BB	BB	BB
S2	AR(1)	BB	BB	BB
S3	AR(1)	AR(1) + cste	BB	BB
S4	AR(1) + cste	BB	BB	BB
S5	AR(1) + cste	BB	BB	BB
S6	AR(1)	BB	BB	BB

Tableau 3 : Les modèles ARIMA des séries temporelles de 30 points décalées à pas de 10

I. 3. Discussion

L'étude des séries temporelles de l'exactitude des rappels nous a permis d'observer et de modéliser la dynamique de la mémorisation d'une séquence de mouvements morphocinétiques.

Notre objectif premier était de mettre en évidence, au niveau des séries de l'exactitude, une relation inter-essais déterministe, qui rendrait compte d'un processus à l'œuvre dans la construction de la représentation visuo-motrice.

Il est important ici de noter que le modèle AR(1) décrit de manière générale des oscillations de relaxation de la mesure autour de la moyenne théorique de la série, que l'on

peut considérer comme un attracteur point fixe. Le coefficient ϕ représente alors la force de cet attracteur, la valeur de coefficient, entre 0 et 1, étant inversement proportionnelle à la force de l'attracteur. Ce que nous appelons ici moyenne théorique, c'est la moyenne qui serait obtenue si la série était infiniment longue. Cette moyenne peut être estimée par la formule suivante :

$$m = \alpha / (1 - \phi)$$

Il faut comprendre que les séries constituées par les 30 premières données, quoique modélisées sous formes de processus AR(1), ne représentent pas la succession d'oscillations de relaxation que l'on pourrait attendre d'une variable oscillant autour d'un attracteur point fixe, mais plus localement une portion de la première relaxation de cette variable en direction de l'attracteur.

Le modèle AR(1) obtenu en début d'apprentissage lorsque tous les sujets observent la cible avant chaque rappel met en évidence une relation déterministe sur deux essais successifs. Cette relation déterministe suggère que le rappel au temps t est principalement déterminé par le rappel au temps précédent, et dirigé en direction de la cible. .

Ce modèle AR(1) ne va pas dans le sens d'un apprentissage sous-tendu par une référence évoluant lentement au cours des essais. Au contraire, il suggère un comportement exploratoire, qui s'appuie sur le cheminement déjà parcouru et qui est guidé par le but à atteindre : la cible (Newell, Kugler van Emmerick & McDonald, 1989).

Les propriétés du modèle AR(1) mettent en évidence que la série est organisée pour atteindre la cible ou une distance non loin de la cible (lorsque le modèle est assorti d'une constante). Cette propriété du modèle AR(1) laisse penser que la présentation de la cible à chaque essai organise fortement le comportement de la série.

L'analyse des séries temporelles de l'exactitude des 30 derniers essais, lorsque les rappels sont relativement stables près de la cible, met en évidence un modèle de bruit blanc BB, excepté pour deux sujets. Ce modèle suggère que les rappels n'évoluent plus en fonction du temps, qu'ils sont distribués aléatoirement autour d'une référence stable. Comme l'avaient observé Giraudo et Pailhous (1999), ce modèle suggère l'absence d'apprentissage et / ou d'oubli, il caractérise un « état de connaissance ». Cette référence stable autour de laquelle les rappels sont distribués aléatoirement suggère que les rappels moteurs sont déterminés par une seule et même représentation du patron moteur, stabilisée en mémoire. Les rappels sont entachés au niveau des « sorties motrices » par de l'erreur aléatoire à l'origine de la variabilité restante.

Ce résultat est à rapprocher des études qui émettent des hypothèses sur les sources de variabilité. Les modèles obtenus nous informent sur la nature des variations des rappels par rapport à la cible. Ainsi, lors des 30 premiers essais, une partie des variations des rappels était construite, déterminée pour approcher la cible et une partie était purement aléatoire (le terme ϵ_i). A l'inverse pour les 30 derniers essais l'ensemble des variations des rappels par rapport à la cible est purement aléatoire. Ce résultat est cohérent avec les hypothèses de Wing et Kristoffersson (1973) sur les sources de variabilité et leurs propriétés.

Dans leur modèle, Wing et Kristoffersson (1973) distinguent deux sources de variabilité, une variabilité de source centrale qui est issue de l'activité du système nerveux central et une variabilité dite périphérique qui est générée au niveau des effecteurs. Cette dernière variabilité encore appelée erreur motrice, tend à être non corrélée dans le temps (Gilden, 2001, Wing & Kristoffersson, 1973), en d'autres termes sa distribution présente les propriétés du bruit blanc gaussien et se modélise par un processus de bruit blanc.

Ces résultats rapportés à notre étude confortent l'interprétation que nous avons faite de l'état de stabilité, modélisé par le modèle de bruit blanc BB et appelé « état de connaissance ».

La succession des deux modèles dans les séries temporelles de l'exactitude suggère que l'on passe d'un comportement qui varie principalement en fonction des variations du contenu de la représentation visuo-motrice, à un comportement qui, parce que le contenu de la représentation visuo-motrice n'évolue plus, varie seulement en fonction des sources de variations restantes : la variabilité périphérique. Autrement dit, il n'y a plus de processus relatif à la modification du contenu de la représentation visuo-motrice à l'œuvre dans les séries temporelles des 30 derniers essais, l'apprentissage est achevé.

L'étude de l'évolution de la structure des séries temporelles de l'exactitude nous permet d'observer que 8 sujets sont à l'état de connaissance dès le 10^{ème} essai. On remarque que les deux sujets qui présentent des corrélations significatives lors des 30 derniers essais présentent un état stable du 10^{ème} au 40^{ème} essai. Ce résultat laisse supposer une stagnation dans l'apprentissage puis une reprise.

Enfin, l'arrêt de la présentation du modèle ne semble pas avoir d'effet sur les rappels, cela suggère que le processus de migration est achevé, les sujets n'ont plus besoin d'être extérieurement renforcés (Giraud & Pailhous, 1999).

II. Modélisation de la dynamique de la Distorsion

Expérience 1

On observe fréquemment que les « sorties de la mémoire » diffèrent des « entrées » (Schacter, 1997) et que les rappels ne sont pas exacts non pas parce que l'information est oubliée, c'est-à-dire absente, mais parce qu'elle a été distordue ou modifiée.

Les distorsions ont pendant longtemps été un problème théorique et empirique fondamental des chercheurs en psychologie qui s'intéressaient à la compréhension du fonctionnement de la mémoire (Bartlett, 1932, Neisser, 1967) ou des chercheurs qui s'intéressaient à des problèmes plus appliqués comme la solidité des témoignages des témoins visuels (Loftus, 1979). Pour autant, cet objet de recherche a été délaissé en psychologie expérimentale et cognitive pour l'étude quasiment exclusive des aspects quantitatifs de la mémoire.

La démonstration empirique des distorsions est permise à la fin du XIX^{ème} siècle, grâce à l'avancée méthodologique qu'offrent les travaux d'Ebbinghaus. Les distorsions sont mises en évidence dès lors que les « entrées » dans les études sur la mémoire sont contrôlées de manière systématique. De cette période, Schacter (1997) retient deux interprétations de ce phénomène.

La plupart du temps les distorsions sont perçues comme le résultat de la décoloration, du déclin ou de l'altération spontané(e) au cours du temps du contenu mnésique stocké.

La seconde interprétation est proposée par Semon (1904/1921, 1909/1923, cité dans Schacter, 1997). Cet auteur est principalement connu pour l'invention du terme d'engramme « *engram* », terme qui était utilisé pour qualifier les changements physiques ou la trace dans le cerveau qui représentait une mémoire. Son modèle théorique de la mémoire propose une interprétation explicative du phénomène des distorsions. Il suggère un lien étroit entre les processus d'encodage, qu'il nomme « *engraphy* » et les processus de récupération, qu'il

nomme « *ecphory* ». Etymologiquement, le terme « *ecphorie* » est un terme grec et signifie « être rendu connu » (Baddeley, 1992). Selon Semon, tout acte d'engraphie (codage + stockage) implique des « *ecphories* » de pensées, d'images qui sont activées par la situation. Ainsi la création d'un engramme (trace mnésique) n'est pas la simple réplique de la réalité mais d'avantage une « interprétation » qui inclut des informations récupérées (Schacter, 1997). Tulving (1983) reprend le modèle de Semon et définit « *l'ecphorie* » comme le processus par lequel la trace mnésique (l'engramme) est combinée avec l'indice de récupération pour donner naissance à « un souvenir conscient de certains aspects de l'événement original » (Tulving, 1976, cité par Baddeley, 1992). Ce modèle rend compte de la présence de distorsions ou d'erreurs dans les rappels par le fait que la trace créée dans le système mnésique n'est pas la réalité, ce qui a pour conséquence que les sorties « mnésiques » ne peuvent pas être des copies de la réalité, elles n'en sont que quelques aspects.

Enfin, Semon explique la génération de distorsions au travers des rappels successifs par le fait que tout acte « *d'ecphorie* » (tout rappel) s'accompagne nécessairement d'un acte « *d'engraphie* ». Plus précisément, l'acte d'*ecphorie* est aussi un acte d'*engraphie*, pour la raison que le rappel d'un souvenir génère son réencodage en mémoire. Ce qui a pour conséquence de renforcer le souvenir rappelé (la trace) mais aussi de renforcer les éléments qui n'appartenaient pas au souvenir original.

Puis les travaux sur les distorsions se développent pendant le premier quart du XXème siècle et cherchent à mettre en évidence les principes de génération des distorsions ou encore leurs conditions d'apparition

Les psychologues de la Gestalt mènent des études dans le but de mettre en évidence des changements autonomes de la trace mnésique. Ces changements spontanés sont envisagés se diriger vers de « bonnes formes ». Par exemple, les formes visuelles sont attendues comme devenant plus régulières et symétriques avec le temps. Koffka (1935) propose un modèle

explicatif des effets des changements autonomes et intrinsèques de la trace mnésique pour rendre compte des phénomènes de distorsions de mémoire (Estes, 1997 ; Schacter, 1997 ; Koriat, Goldsmith & Pansky 2000). Dans cette approche, l'engramme mnésique n'est pas « une impression immuable qui se brouille avec le temps » (Wulf, 1922, in Koriat *et al.* 2000), mais est variable dans le temps et soumis à des lois (Gestalt laws) qui le réorganisent. Ce modèle a été remis en cause, en partie parce que la réorganisation spontanée de l'information vers de bonnes formes ne s'observe pas aussi systématiquement que le suppose la théorie de la gestalt (Zangwill, 1937 ; Estes, 1997).

Dans cette période, ce sont les travaux de Bartlett (1932) qui constituent l'avancée la plus notable dans l'étude des distorsions. Pour Bartlett, les souvenirs rappelés sont une « reconstruction imaginative » des événements passés qui est fortement influencée par les structures de connaissances qui préexistent. En d'autres termes, c'est sur la base des informations que l'on a en mémoire (connaissances) que l'on enregistre de nouvelles informations (que l'on construit nos souvenirs). La notion de schéma permet à Bartlett d'expliquer que ce qui est retenu dépend des connaissances qui préexistent et réciproquement ce sont elles qui déterminent ce qui est reconstruit. Il définit le schéma comme : « une organisation active des réactions passées ou d'expériences passées, que l'on doit toujours supposer à l'œuvre dans toute réponse organique bien adaptée. Ceci veut dire que, à chaque fois que le comportement se révèle ordonné et régulier, une réponse particulière n'est rendue possible que par sa relation à d'autres réponses similaires, qui ont été organisées séquentiellement, mais qui opèrent néanmoins comme une masse unitaire et non comme des éléments individuels venant l'un après l'autre » (1932, p. 201, cité dans Schacter, 1996). Bartlett envisage l'activité mnésique comme une reconstruction plutôt qu'une reproduction et conclut « Elle [la mémoire] n'est donc presque jamais vraiment exacte [...] » (1932, p. 213).

Enfin, les travaux de Bartlett sont largement cités dans ceux de Neisser (1967) qui partage l'idée d'une mémoire reconstructive. Il illustre cette idée par l'image du paléontologue qui tente de reconstruire un dinosaure à partir de fragments de fossiles (Schacter, 1997). Neisser précise que le rappel de mémoire n'est pas le réallumage d'une trace mnésique dormante, mais davantage la reconstruction avec l'aide de nos connaissances, des fragments de l'épisode original qui sont en mémoire. Dans cette perspective, tout rappel est une reconstruction de « parties » d'événement grâce à des connaissances plus générales (Schacter, 1997).

Ce qui est essentiel de retenir des modèles de Semon, de Bartlett et de Neisser est que les distorsions sont présentées comme les produits du fonctionnement normal de la mémoire. Ces modèles suggèrent que l'étude des distorsions est tout aussi fondamentale à la compréhension de la mémoire humaine que l'étude de ses aspects les plus exacts (Schacter, 1997, p.20).

La littérature contemporaine sur les distorsions mnésiques ne fait pas le consensus et les questions à ce sujet sont les mêmes depuis plus de 50 ans (Loftus, 1997). On peut résumer les positions des chercheurs suivant deux conceptions. D'une part, l'approche structuraliste de la mémoire envisage les distorsions et l'oubli comme la conséquence d'une défaillance dans la récupération des informations (théorie de l'interférence, amnésie rétro et antérograde). Dans cette approche, le contenu de la représentation est considéré comme « figé », « fixé » en mémoire à long terme, seul l'accès à la représentation (le processus de récupération) est défaillant. Une seconde hypothèse est proposée, celle de la décoloration de la trace, qui fait référence à une conception associationniste de la mémoire. Les distorsions sont le fruit d'une dégradation de la trace.

S'opposent à ces conceptions les travaux qui envisagent la modification du contenu des représentations pour rendre compte des distorsions et de l'oubli. Dans cette perspective,

les distorsions sont l'expression de l'activité reconstructive de la mémoire. nous allons nous intéresser au processus impliqué dans la modification du contenu de la représentation mnésique (Loftus, 1997).

La mise en évidence et l'étude des distorsions nécessitent que les performances mnésiques soient évaluées au travers d'une variable qualitative qui rende compte de l'exactitude des rappels. De plus la mesure des distorsions doit être répétée afin que les distorsions ne puissent pas être assimilées à une erreur aléatoire sans signification.

Koriat, Goldsmith et Pansky (2003) suggèrent de manière générale qu'un souvenir fort, c'est-à-dire qui a été fortement encodé et fréquemment récupéré, a très peu de chance de présenter des distorsions lors des rappels, et à l'inverse un souvenir fragile aura de fortes chances d'être soumis à des distorsions lors de son rappel (Schacter, 1997). En d'autres termes, il semblerait que la « *solidité* » de la représentation en mémoire soit un critère déterminant l'apparition des distorsions (Schacter, 1998 ; Koriat, Goldsmith & Pansky, 2000).

Giraud et Pailhous (1999) ont étudié les distorsions dans les rappels successifs d'une carte visuo-spatiale. Ces auteurs ont généré des distorsions dans les rappels en interrompant le processus de migration, i.e. en cessant de présenter la cible avant les rappels. Ils montrent que les rappels s'éloignent de la cible, puis se stabilisent. Conjointement à la stabilisation des rappels loin du modèle, ils observent une dynamique de « structuration » au niveau de la mesure de la variabilité des rappels, qui est identique à celle qui accompagnée l'activité de mémorisation de la configuration cible. Ils concluent qu'en l'absence de présentation suffisante de la cible une image présentant un fort degré de distorsion est stabilisée en mémoire à la manière d'une nouvelle image. L'image loin de la cible est assimilée à une nouvelle image en mémoire. Cette étude suggère que l'apparition de distorsions est le fruit du fonctionnement de la mémoire en l'absence des conditions nécessaires à l'apprentissage ou à la mémorisation de la cible. Ce fonctionnement semble être limité dans le temps puisque les

rappels se stabilisent, à des niveaux de stabilité équivalents à ceux observés à l'état de connaissance.

Dans le cadre de l'étude de la dynamique d'un souvenir visuo-moteur et de la modélisation des séries temporelles de l'exactitude, nous avons investi les conditions de génération de distorsions. Nous avons repris de manière similaire à Giraudo et Pailhous un protocole en reproduction sérielle où la cible était présentée de manière insuffisante pour permettre un rappel exact et stable.

Nos attentes, en terme de modélisation, étaient que si les distorsions sont un fonctionnement normal de la mémoire où le contenu de la représentation est modifié, alors l'évolution des rappels rendra compte d'un processus à l'œuvre. En d'autres mots, la série temporelle, si elle est générée par un processus central présentera une structure identifiable. Cette idée renvoie à l'hypothèse plus générale que lorsqu'un comportement varie dans le temps sous l'effet du fonctionnement d'un processus central, (d'apprentissage ou de distorsion), ce comportement est autocorrélé dans le temps. Plus précisément, nous faisons l'hypothèse que la présentation insuffisante de la séquence modèle engendrera une activité fortement « reconstructive » qui s'exprimera au travers de l'apparition de distorsions systématiques dans les rappels successifs. Ces distorsions s'exprimeront principalement dans la mesure de l'exactitude, qui rendra compte des changements qualitatifs des rappels. L'apparition de distorsions systématiques devrait s'exprimer au niveau des séries par l'apparition d'une tendance dans les performances de rappels. Au cours du temps, nous pensons que les rappels vont se stabiliser loin du modèle (Giraudo & Pailhous, 1999). Les distorsions entre les rappels devraient être de moins en moins importantes, indiquant la stabilisation du contenu de la représentation. Cette stabilisation devrait s'exprimer par une dynamique déjà observée à l'état de connaissance et modélisée par un modèle de Bruit Blanc.

Enfin, nous nous attendons à ce que la re-présentation du modèle réenclenche un processus de migration (c'est-à-dire une évolution des rappels en direction du modèle) identique à celui observé dans la première étude (P1, P2).

II. 1. Méthode

Le but de la tâche, le matériel, le traitement et l'analyse des données sont les mêmes que dans l'étude précédente.

✓ Sujets

6 sujets jeunes filles droitières, âgées de 18 à 24 ans ont participé à cette expérience.

✓ Procédure

La procédure de familiarisation est la même que précédemment ; la séquence modèle (la cible) est présentée deux fois aux sujets. La cible est présentée une troisième fois, puis les sujets rappellent la séquence 50 fois successivement sans nouvelle présentation du modèle. A partir du 51^{ème} essai, le modèle est systématiquement présenté avant chaque rappel jusqu'au 100^{ème} essai.

✓ Analyse des données

Les séries temporelles de l'exactitude sont analysées à l'aide des modèles ARIMA (Box & Jenkins, 1976) sur les 50 premiers essais puis sur les 50 derniers.

L'évolution de la structure des séries est étudiée sur des séries de 30 points décalées à pas de 10.

II. 2. Résultats

Les séries temporelles de deux sujets sont présentées dans la figure 8.

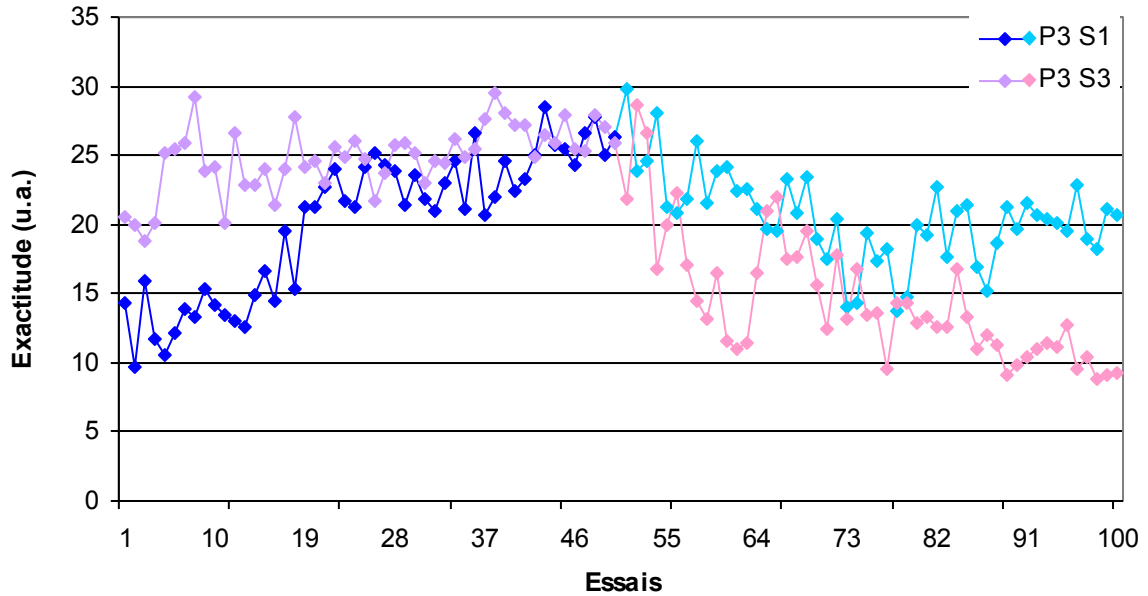


Figure 8 : Série de l'exactitude de 2 sujets de P3 : les 50 premiers essais sont rappelés sans présentation du modèle ; les 50 derniers sont rappelés avec une présentation du modèle systématique

II. 2. 1. Les 50 premiers essais

L'analyse des séries temporelles des 50 premières valeurs de l'exactitude met en évidence un modèle de moyenne mobile avec différenciation, ARIMA (0,1,1) ou MA(1)D(1).

Les séries temporelles de l'exactitude ne sont pas stationnaires, c'est-à-dire la moyenne et / ou la variance des séries évoluent dans le temps. Cette non stationnarité s'observe dans les ACF qui présentent une persistance des autocorrélations significatives sur un grand nombre de décalages ($\text{lag} > 7$), justifiant l'introduction d'un terme de différenciation.

Une fois les séries temporelles différenciées, les ACF et les PACF présentent la signature d'un modèle de moyenne mobile à un terme ; l'ACF présente un pic significatif au premier décalage et la PACF présente une décroissance exponentielle des corrélations.

Les séries répondent à l'équation de prédiction suivante :

$$y_t = \alpha + y_{t-1} - \theta \varepsilon_{t-1} + \varepsilon_t \quad (\text{équation 3})$$

où

y_t représente l'observation au temps t ,

ε_t un terme de bruit blanc entachant l'observation réalisée au temps t ,

α la constante de différenciation,

θ le coefficient de moyenne mobile.

Les coefficients estimés pour chaque sujet sont présentés dans le tableau 4. A noter que dans tous les cas la constante de différenciation n'est statistiquement pas différente de 0, et est donc absente du modèle.

P3	01 . 50
S1	$Y_t = Y_{t-1} - 0,531\varepsilon_{t-1} + \varepsilon_t$
S2	$Y_t = Y_{t-1} - 0,506\varepsilon_{t-1} + \varepsilon_t$
S3	$Y_t = Y_{t-1} - 0,595\varepsilon_{t-1} + \varepsilon_t$
S4	$Y_t = Y_{t-1} - 0,387\varepsilon_{t-1} + \varepsilon_t$
S5	$Y_t = Y_{t-1} - 0,533\varepsilon_{t-1} + \varepsilon_t$
S6	$Y_t = Y_{t-1} - 0,749\varepsilon_{t-1} + \varepsilon_t$

Tableau 4 : Les équations des modèles MA(1)D(1) des séries temporelles des 50 premiers essais

II. 2. 2. Evolution de la structure des séries des 50 premiers essais

La modélisation des séries temporelles de 30 valeurs d'exactitude décalées à pas de 10 essais permet d'observer une éventuelle modification de la structure des série temporelles, notamment la disparition de pics significatifs dans les ACF et les PACF (cf. tableau 5).

L'étude des séries de 30 valeurs d'exactitude décalées de 10 essais met en évidence que le modèle de moyenne mobile à une terme avec différenciation, MA(1)D(1) est présent pour tous les sujets sur les 30 premières valeurs, pour 5 sujets sur 6 des essais 11 à 40 et pour seulement 2 sujets des essais 21 à 50.

La structure des séries temporelles tend à se modifier en faveur d'un modèle de bruit blanc. Ce modèle suggère qu'une représentation présentant un fort degré de distorsion serait stabilisée en mémoire.

P3	1.30	11.40	21.50
S1	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	BB
S2	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	MA(1) + Cste
S3	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)
S4	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	BB
S5	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)
S6	MA(1)D(1)	BB	BB

Tableau 5: Les modèles ARIMA obtenus pour les séries temporelles de 30 points décalées tous les 10 essais

Par ailleurs, un nouveau modèle de moyenne mobile à un terme avec constante est mis en évidence pour l'un des sujets dont la série répond à l'équation suivante :

$$y_t = \alpha - \theta\varepsilon_{t-1} + \varepsilon_t \quad (\text{équation 4})$$

où y_t représente l'observation au temps t ,

α est une constante,

ε_t un terme de bruit blanc entachant l'observation réalisée au temps t ,

θ le coefficient de moyenne mobile.

Ce modèle présente comme propriété d'être stationnaire et de posséder une référence, ce qui suggère une stabilité importante de la série.

La différence entre ce modèle et le modèle de bruit blanc ne se situe pas au niveau de la stabilité de la série mais au niveau de son organisation. Le modèle de bruit blanc suggère une activité de « reproduction » : une référence est reproduite avec quelques aléas lors de l'exécution. Tandis que dans ce nouveau modèle une référence est reproduite et une portion des erreurs aléatoires de l'essai précédent est aussi présente. Ce modèle suggère que l'erreur aléatoire qui a entaché l'essai précédent persiste dans l'essai suivant, sans pour autant modifier la référence. Précisons que nous ne sommes pas face à un modèle de moyenne mobile qui fonctionne en correction d'erreur car le coefficient de moyenne mobile obtenu est <0 . Nous retiendrons de ce modèle qu'il est stationnaire.

II. 2. 3. Les 50 derniers essais

Les fonctions d'auto-corrélation et d'auto-corrélation partielle des séries des 50 derniers essais présentent la signature typique d'un processus autorégressif. C'est un modèle auto régressif à un terme avec constante qui est retenu pour les 6 sujets (cf. équation 1)

Le modèle retenu est donc formulé de la manière suivante :

$$y_t = \mu + \phi y_{t-1} + \varepsilon_t \quad \text{équation (1)}$$

où

μ est une constante,

ε_t un terme de bruit blanc entachant l'observation au temps t ,

ϕ le coefficient auto-régressif.

Les valeurs des coefficients estimées sont présentées dans le tableau 6

P3	51.100
S1	$Y_t = 20.829 + 0.489 Y_{t-1} + \varepsilon_t$
S2	$Y_t = 13.012 + 0.538 Y_{t-1} + \varepsilon_t$
S3	$Y_t = 15.652 + 0.755 Y_{t-1} + \varepsilon_t$
S4	$Y_t = 13.644 + 0.317 Y_{t-1} + \varepsilon_t$
S5	$Y_t = 16.729 + 0.631 Y_{t-1} + \varepsilon_t$
S6	$Y_t = 14.735 + 0.415 Y_{t-1} + \varepsilon_t$

Tableau 6 : Les équations du modèle $AR(1) + Cste$ obtenues sur les séries temporelles des 50 derniers essais.

II. 2. 4. Evolution de la structure des séries 50 derniers essais

La modélisation des séries temporelles de 30 valeurs d'exactitude décalées tous les 10 essais permet d'observer une modification de la structure de ces séries (cf. tableau 6).

P3	51.80	61.90	71.100
S1	AR(1)	AR(1)+ Cste	BB
S2	AR(1)+ Cste	AR(1)	AR(1)+ Cste
S3	AR(1)+ Cste	AR(1)+ Cste	AR(1)
S4	AR(1)	BB	BB
S5	AR(1)+ Cste	AR(1)+ Cste	AR(1)+ Cste
S6	AR(1)+ Cste	AR(1)+ Cste	BB

Tableau 7 : Les modèles ARIMA des séries temporelles de 30 points décalées à pas de 10

L'évolution de la structure des séries se fait en faveur d'un modèle de Bruit Blanc. L'analyse des séries temporelles des 30 derniers essais met en évidence que 3 sujets présentent une structure de bruit blanc et maintiennent une structure autorégressive.

II. 3. Discussion

L'objectif premier de cette étude était de mettre en évidence que la reproduction sérielle d'une séquence de mouvements, en l'absence de sa mémorisation préalable (processus de migration), engendrerait l'apparition systématique de distorsions dans les rappels successifs. L'apparition des distorsions devrait alors s'observer dans la modification du contenu des rappels, suggérant une modification du contenu de la représentation mnésique. Cette modification serait liée à l'activité reconstructive de la mémoire.

Les résultats obtenus sur les séries temporelles des 50 premiers essais mettent en évidence que les séries ne sont pas stationnaires. Cette non stationnarité signifie que les moyennes des séries évoluent dans le temps, autrement dit qu'il y a une évolution des performances de rappel et qu'elle n'est pas liée à un processus d'apprentissage. Cette évolution des rappels suggère l'apparition de distorsions. Les rappels au cours des essais sont de plus en plus différents des premiers et de plus en plus éloignés de la cible.

Le modèle de moyenne mobile à un terme avec différenciation obtenu pour les 50 premiers essais est également connu sous le terme de lissage exponentiel simple (*simple exponential smoothing model*, SESM), et est caractéristique des séries temporelles qui présentent des fluctuations bruitées autour d'une valeur moyenne évoluant lentement (Spray & Newell, 1986). Il a été mis en évidence dans des séries temporelles rendant compte d'un apprentissage moteur sans connaissance du résultat (Spray & Newell, 1986 ; Blackwell, Simmons & Spray, 1991), dans la modélisation de la dynamique de l'estime de soi (Fortes,

Ninot & Delignières, sous presse) et dans les temps de réponse dans une tâche de Stroop (Zalewski, Smith, Hart, Schot, & Endejan, 1999).

Ce modèle MA(1)D(1) associe deux processus qui s'opposent en partie dans les comportements qu'ils engendrent. Le premier processus peut être qualifié de « préservant », dans la mesure où il tente de préserver les rappels au plus près d'une « référence », pour cela il retranche de l'erreur. Plus précisément, il tend à reproduire la valeur précédente (y_{t-1}) en lui retranchant une partie de l'erreur qui l'avait entachée ($-\theta\varepsilon_{t-1}$). Le second processus peut être qualifié d'« intégrant », car il intègre dans la « référence » la portion d'erreur aléatoire qui n'a pas été corrigée (i.e., $(1-\theta)\varepsilon_{t-1}$). Ceci a pour conséquence de faire inexorablement dévier dans le temps la « référence », en lui intégrant à chaque nouvel essai une portion d'erreur.

Dans ce modèle, les rappels sont corrélés entre eux, au travers des portions d'erreur aléatoire qui entachent les essais. Cette présence de corrélation laisse penser à l'existence d'un processus central qui fonctionnerait sur la base de processus aléatoires et irréductibles (une variabilité non corrélée). Contrairement au modèle autorégressif dont les séries étaient construites en fonction de l'essai précédent et du modèle à atteindre, les séries temporelles du modèle de moyenne mobile avec différenciation sont corrélées au travers de l'erreur aléatoire, dont une portion est supprimée et l'autre intégrée. Ce fonctionnement laisse penser que c'est l'absence d'une référence plus élaborée qui conduit à prendre comme référence l'essai précédent.

Ce modèle suggère que le rappel de mémoire d'une séquence de mouvements sans apprentissage préalable repose sur l'activité reconstructive de la mémoire. Nous nommerons ce comportement modélisé par un modèle de moyenne mobile avec un terme de différenciation : dynamique de distorsion. Cette dynamique de distorsion suggère une instabilité du contenu mnésique, car malgré la présence du processus de préservation de la

référence, c'est le processus intégrant qui produit l'effet le plus déterminant sur les rappels (la dérive des rappels loin de la cible).

Contrairement aux résultats de Giraudo et Pailhous (1999) nous n'observons pas, pour tous les sujets, une stabilisation des rappels loin de la cible. Nous nous attendions à ce que la dynamique de distorsion soit temporaire et qu'une représentation du patron loin de la cible soit stabilisée et consolidée en mémoire. Nous pensions observer une modification de la structure des séries temporelles en faveur d'un modèle de bruit blanc.

L'analyse des séries temporelles des 30 derniers essais sans présentation du modèle met en évidence que 3 sujets présentent un modèle de bruit blanc, 2 sujets maintiennent le modèle de moyenne mobile avec différenciation MA(1)D(1) et un sujet présente un modèle de moyenne mobile à un terme avec constante MA(1)+cste. Ce résultat suggère des différences interindividuelles en terme de dynamique de processus (Blackwell, Simmons & Spray, 1991 ; Spray & Newell, 1986 ; Zalewski, Smith, Hart, Schot, & Endejan, 1999).

L'étude et la modélisation de la dynamique d'un processus sont toujours dépendantes de l'intervalle ou de la fenêtre temporelle considéré(e). On peut faire l'hypothèse que l'intervalle temporel (ici : représenté par les 50 essais) n'est pas assez long pour observer la stabilisation des rappels à un état de connaissance pour tous les sujets. Ce résultat constitue une différence importante avec les travaux de Giraudo et Pailhous (1999). On peut aussi penser que la différence de matériel utilisé puisse expliquer en partie cette différence. Notre étude nécessite l'élaboration d'une coordination perceptivo-motrice particulièrement complexe, il se peut que chaque matériel à mémoriser possède une dynamique particulière qui génère plus rapidement des états de stabilité.

De manière générale, il est rapporté dans la littérature que les distorsions se minimisent avec le temps, que les rappels se simplifient, se normalisent et se stabilisent (Bartlett, 1932 ; Estes, 1997 ; Zangwill, 1937). Nous pensons que notre étude nécessite d'être d'avantage approfondie pour conclure ou rejeter l'idée de la stabilisation d'un état de connaissance loin de la cible.

L'analyse des séries temporelles des 50 derniers essais où le modèle est à nouveau présenté avant chaque rappel, met en évidence un modèle autorégressif à un terme avec constante. Il a précédemment été observé dans les mêmes conditions de rappel. De manière générale, ce modèle exprime la dynamique d'une série réalisant des oscillations de relaxation autour d'une valeur. Dans le cas présent, il décrit la migration des séries vers une valeur caractéristique de l'état de connaissance.

Expérience 2

L'expérience précédente nous a permis de modéliser une dynamique dite de distorsion. En effet, lorsque le processus de migration n'a pas eu lieu, le rappel successif d'une séquence de mouvements engendre un comportement qui se caractérise principalement par l'introduction d'erreurs ou de distorsions dans les rappels successifs. Toutefois, l'évolution du contenu de la représentation mnésique n'est pas sous la seule dépendance du processus d'intégration d'erreur, un second processus est à l'œuvre qui cherche à préserver « une référence » mais qui, au final, a pour simple effet de minimiser la modification du contenu de la représentation.

Il est important de retenir que les essais sont liés (dépendants) entre eux au travers de ce processus de correction d'erreur. Ce processus est modélisé dans l'équation par le terme de moyenne mobile ($-\theta\varepsilon_{t-1}$). Le coefficient de moyenne mobile rend compte de la portion d'erreur qui est « retranchée » ou « corrigée ». Lorsque le coefficient de la moyenne mobile est proche de 1, cela suggère que la quasi totalité de l'erreur qui a entaché l'essai précédent a été corrigée, cela suggère un comportement très préservant, les rappels sont peu soumis à des distorsions. Notons qu'un modèle de moyenne mobile MA(1) avec différenciation où le coefficient MA est égal à 1 équivaut à un modèle de bruit blanc, c'est-à-dire à une constante associée à un processus de bruit blanc aléatoire ; en d'autres termes il traduit un état de préservation maximale de la représentation puisqu'elle n'est plus une fonction du temps.

A l'inverse, un coefficient de moyenne mobile qui est proche de zéro suggère que le processus intégrant détermine majoritairement l'évolution du comportement. Chaque expression du comportement entraîne sa modification et ces modifications évoluent en fonction du processus aléatoire. La référence évolue comme la fonction d'erreur aléatoire ; ce modèle suggère une absence de mémoire, la représentation est en perpétuel changement. Il s'agit en fait d'une marche au hasard, ou mouvement Brownien.

Nous avons repris le protocole précédent afin de répondre aux deux questions suivantes :

Une dynamique de distorsion est-elle suivie d'un état stable loin de la cible ?

Le niveau d'élaboration de la représentation détermine-t-il le niveau de préservation du processus de distorsion ? En d'autres termes, l'apparition des distorsions est-elle minimisée lorsque la représentation est un plus élaborée ?

La première question fait référence à l'idée qu'il est difficilement concevable que le contenu d'une représentation évolue indéfiniment. Il paraît impossible, dans des cas non pathologiques et chez des sujets jeunes de ne pas stabiliser un contenu alors même qu'on le répète. Aussi, si l'on n'a pas observé d'état de stabilité des rappels loin du modèle, on peut émettre l'hypothèse que l'intervalle temporel considéré était trop court.

Le seconde question fait référence à la conception que l'apparition de distorsions est étroitement liée au niveau de solidité ou de construction de la représentation mnésique (Koriat, Goldsmith & Pansky, 2003). Nous avons testé l'apparition de distorsions dans les rappels dans la condition la plus favorable au regard de la littérature, c'est-à-dire en l'absence de mémorisation. On peut faire l'hypothèse que la dynamique du processus de distorsion après quelques essais de migration serait différente. Cette différence s'exprimerait par des dynamiques plus ou moins « préservantes ». Dans la logique du modèle de moyenne mobile avec différenciation obtenu pour la précédente étude, on peut s'attendre à ce que le terme de moyenne mobile, c'est-à-dire la portion d'erreur corrigée, soit plus proche de 1 lorsque quelques essais de migration auront précédé les rappels.

Enfin, l'agrandissement de la fenêtre temporelle par l'augmentation du nombre d'essais devrait permettre d'observer une éventuelle stabilisation des rappels loin du modèle, c'est à dire une transition du processus de distorsion vers un état de connaissance.

II. 4. Méthode

✓ Sujets

Douze sujets droitiers, de sexe féminin, participent à cette expérience. Le but de la tâche est de reproduire de mémoire (i.e. en l'absence de la cible), le plus précisément possible, une séquence de mouvements du bras droit. Les sujets sont réparties aléatoirement dans deux groupes

✓ Procédure

La familiarisation consiste à observer la séquence « cible » deux fois successivement.

Les 6 sujets du groupe P4 observent la séquence une fois et la rappellent de mémoire 100 fois.

Les 6 sujets du groupe P5 ont 10 essais de « migration », c'est-à-dire 10 essais avec une présentation de la cible avant chaque rappel. Puis ils rappellent de mémoire 100 fois la séquence.

L'ensemble de la procédure d'acquisition des données et du traitement des données est identique aux protocoles précédents.

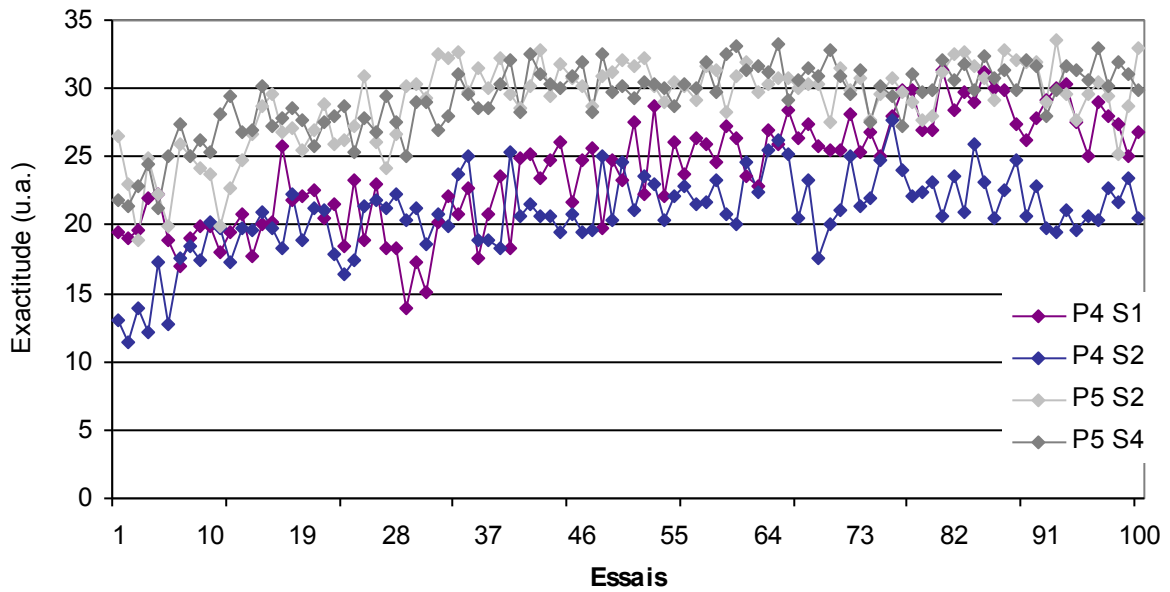
✓ Analyse des données

Les séries temporelles de l'exactitude sont analysées à l'aide des modèles ARIMA (Box & Jenkins, 1976) sur les 100 essais sans présentation de la cible, puis sur des fenêtres de 50 essais décalées à pas de 10 essais afin d'observer l'évolution de la structure des séries.

II. 5. Résultats

II. 5. 1. Analyse des série de 100 essais

L'analyse des séries temporelles de l'exactitude sur les 100 essais sans présentation de la cible met évidence un modèle de moyenne mobile avec différenciation (cf. Figure 9). Les coefficients des modèles sont présentés dans le tableau 8.



Graphes 9 : Séries temporelles de l'exactitude des 100 rappels sans présentation du modèle pour 2 sujets du groupe P4 et 2 du groupe P5.

Coefficient MA(1)	P4	P5
S1	0.537	0.683
S2	0.694	0.653
S3	0.645	0.735
S4	0.612	0.667
S5	0.832	0.754
S6	0.634	0.935

Tableau 8 : Les valeurs des coefficients de moyenne mobile des série temporelles de 100 essais sans présentation du modèle

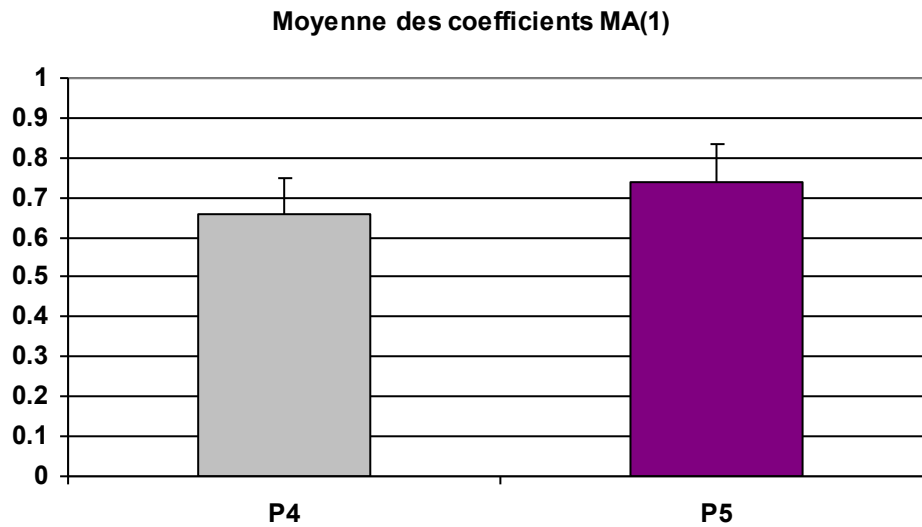


Figure 10 : Moyennes des coefficients MA(1) des groupes P4 et P5

L'ANOVA à un facteur (groupe) ne met pas en évidence de différence significative entre les coefficients de moyenne mobile de P4 et P5 ($F(1, 10) = 1,7933$, $p = \text{NS}$) (cf. figure 10).

II. 5. 2. Evolution de la structure des séries temporelles

La modélisation des séries temporelles de 50 valeurs d'exactitude décalées à pas de 10 permet d'observer une modification de la structure des séries, notamment la disparition de pics significatifs dans les ACF et les PACF (cf. tableau 10).

P4	1 . 50	11. 60	21. 70	31 . 80	41 . 90	51 . 100
S1	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)
S2	MA(1)D(1)	BB	BB	BB	BB	BB
S3	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	MA(1)+Cste	BB	BB
S4	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	BB	BB	BB	BB
S5	MA(1)D(1)	BB	BB	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	BB
S6	MA(1)D(1)	BB	BB	BB	BB	BB
P5	1 . 50	11. 60	21 . 70	31 . 80	41 . 90	51 . 100
S1	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	BB	BB	BB	BB
S2	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	BB	BB	BB
S3	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	MA(1)+Cste	BB	BB
S4	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	BB	BB	BB
S5	BB	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)
S6	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	BB	BB	BB	BB

Tableau 10 : Les modèles obtenus sur les séries temporelles des 50 points décalés à pas de 10 essais pour les sujets des groupes P4 et P5

D'une manière générale on observe une sur-représentation des modèles de moyenne mobile lors des premiers essais, et au contraire une sur-représentation des modèles de Bruit Blanc lors des derniers. Chez certains sujets le modèle de moyenne mobile perdure tout au long des 100 essais, ou parfois réapparaît après une phase de bruit blanc.

II. 6. Discussion

Ce protocole avait le double objectif de mettre en évidence une stabilisation d'un état de distorsion et d'observer des processus de distorsions qualitativement différents, c'est-à-dire plus ou moins préservants.

L'analyse des séries temporelles sur les 100 essais sans présentation du modèle nous a permis de tester l'hypothèse que les quelques essais de migration avaient pour conséquence d'engendrer un processus de distorsion plus préservant. L'analyse des coefficients de moyenne mobile ne va pas dans le sens de cette hypothèse. L'ANOVA sur les valeurs des coefficients de moyenne mobile ne met pas en évidence de différence significative.

Ce protocole visait aussi à observer une stabilisation des rappels loin de la cible, et pour cela, nous avons allongé l'intervalle temporel d'observation. C'est au travers de l'étude des séries temporelles de 50 données décalées à pas de 10 essais que nous avons pu mettre en évidence la stabilisation d'un état de distorsion. Toutefois cette analyse est marquée des différences inter individuelles importantes dans l'évolution des dynamiques. On observe que 11 sujets présentent un modèle de moyenne mobile avec un terme de différenciation lors des 50 premiers essais, et 10 sujets présentent une structure de Bruit Blanc lors de leurs 50 derniers essais. Les 2 sujets restants maintiennent le modèle de moyenne mobile avec un terme de différenciation. La succession d'un modèle de moyenne mobile avec différenciation MA(1)D(1) avec le modèle de Bruit Blanc apparaît comme la dynamique qualitative la plus fréquente (10 sujets) bien qu'elle soit marquée par de fortes différences interindividuelles sur le moment de transition. Trois sujets passent en modèle de Bruit blanc dès le premier décalage (essais 11 à 60), 3 au second décalage (essais 21 à 70), 2 au troisième décalage (essais 31 à 80) et encore 2 au quatrième décalage (essais 41 à 90). De plus, on peut isoler 4 résultats qui accentuent les différences interindividuelles :

i) le sujet 1 du groupe P4 maintient un modèle MA(1)D(1) sur les 100 essais. Nous comprenons ce résultat en terme de différence interindividuelle sur le moment de transition vers un état stable « de distorsion », i.e. sur le moment de transition vers une structure de BB,

ii) le sujet 5 du groupe P5 présente un modèle de Bruit Blanc lors des 50 premiers essais puis un modèle MA(1)D(1) pour tous les autres intervalles. Contrairement aux autres sujets qui, dès la suppression du modèle rendent compte d'une dynamique de distorsion, ce sujet (qui a bénéficié de 10 essais de migration) « résiste » au temps et à l'absence d'information et maintient stable un niveau de performance pendant un intervalle de temps. Puis il est repris par une dynamique de distorsion dès le second décalage et la maintient jusqu'à la fin.

iii) deux sujets ne présentent pas une succession directe du modèle de MA(1)D(1) vers un modèle de BB, mais présente un intervalle de points pour lequel le modèle le plus ajusté est un modèle de moyenne mobile à un terme avec constante (MA(1) + Cste). Ce modèle rend compte de la persistance d'une portion d'erreur aléatoire qui avait entaché l'essai précédent ($t-1$), dans le rappel à l'instant t , sans pour autant modifier la référence. C'est un modèle stationnaire, où le rappel est principalement déterminé par la référence stable. Mais les rappels sont bruités selon deux sources : l'erreur aléatoire qui entache toute sortie motrice (ε_t) et une portion de l'erreur aléatoire qui avait entaché les sorties motrices de l'essai précédent ($\theta_{\varepsilon_{t-1}}$). Ce modèle est difficilement interprétable d'un point de vue du fonctionnement de la mémoire et n'apparaît pas fréquemment. Essentiellement, il suggère un état stable « bruité ».

iiii) le sujet 5 du groupe P4 présente une alternance de modèle MA(1)D(1) et de BB. Il transite de MA(1)D(1) en BB dès le premier décalage, puis repasse sur une structure de MA(1)D(1) sur les 4^{ème} et 5^{ème} décalages, et (re)présente un modèle de BB lors des 50 derniers essais. Cette alternance des deux modèles suggère que l'état stable de distorsion pourrait être limité dans le temps.

Ce protocole visait d'observer un changement qualitatif de la dynamique en faveur d'un processus de Bruit Blanc. En effet, il nous semblait que la compréhension du processus de distorsion passait nécessairement par l'observation d'une limite temporelle de son expression. La littérature rapporte que les distorsions au cours des rappels se réduisent et se stabilisent. Ce qui en terme de dynamique suggère une transition vers un « état stable de distorsion ». Par conséquent, nous avons agrandi l'intervalle temporelle de l'étude pour tenter d'observer un état stable de distorsion. Son observation nous a conduit à observer des différences dans les dynamiques, parmi lesquelles la dynamique d'alternance des modèles MA(1)D(1) et BB a retenu notre attention. Ce résultat suggère que le processus de Bruit Blanc qui caractérise un état stable de connaissance peut être limité dans le temps. Littéralement, l'équation du modèle de bruit blanc stipule que la référence n'est plus une fonction du temps, i.e. quelque soit l'intervalle de temps considéré, elle n'évolue plus. En d'autres termes, cela suggère que le contenu de la représentation visuo-motrice est fixée, que cette connaissance acquise n'est plus soumise au effet du temps. Or l'approche fonctionnaliste de la mémoire ou encore l'approche centrée sur l'exactitude de la mémoire ont largement remis en cause cette conception. Par conséquent, ce résultat nous conduit à penser, que sous certaines conditions, un état stable de connaissance disparaît au profit d'une dynamique nouvelle moins stable. Cela nous amène à considérer que i) les états de connaissance jusqu'alors observés sont limités dans le temps et ii) les modèles obtenus sont exacts pour l'intervalle de temps considéré, et ceci même si le modèle obtenu suggère une indépendance face au temps.

III. Modélisation de la dynamique d'un souvenir moteur

Expérience 1

Les conceptions de l'oubli sont intrinsèquement liées aux modèles théoriques auxquels elles sont rattachées, et par conséquent aux dispositifs d'observation et de mesure associés. C'est dans cette perspective d'association des aspects conceptuels et méthodologiques que Koriat, Goldsmith et Pansky (2000, 2003), Goldsmith et Pansky (1996) proposent de distinguer deux conceptions de la mémoire humaine qui font chacune référence à une métaphore de la mémoire, celle de *l'entrepôt* « store house » et celle de la *correspondance*.

L'approche associée à la métaphore de l'entrepôt s'intéresse aux aspects quantitatifs de la mémoire, et se centre sur la quantité d'informations qui peut être stockée et sur celle qui peut être récupérée ou qui est perdue, oubliée (Koriat *et al.*, 2003). Cette première approche fait référence aux conceptions associationnistes et structuralistes de la mémoire humaine.

La seconde approche dite de correspondance, s'intéresse aux aspects qualitatifs des performances mnésiques. L'étude de la mémoire s'opère au travers du contenu des représentations et de l'évolution qualitative des performances mnésiques, le plus souvent en termes d'exactitude.

Les caractéristiques de ces deux approches engendrent des conceptions et des interprétations de l'oubli très différentes.

L'approche centrée sur les aspects quantitatifs des performances mnésiques va principalement modéliser l'oubli au travers de l'omission ou de l'absence d'éléments lors des rappels. On retiendra trois interprétations de l'oubli associées à cette approche : le déclin de la trace, la capacité limitée de la mémoire à court terme et la théorie de l'interférence.

La théorie du déclin est la plus ancienne interprétation et renvoie aux conceptions associationnistes de la mémoire (Brouillet et Syssau, 2000). Cette théorie prend son origine dans les travaux d'Ebbinghaus (1885) qui met en évidence la courbe de l'oubli. Le résultat principal de ces travaux est que l'oubli croît avec le temps au travers d'une fonction monotone négativement accélérée. (Cazayus, 2004). L'oubli est perçu comme une conséquence de la détérioration de la trace mnésique en fonction du temps et en l'absence de l'activation de cette trace. Cazayus (2004, p.36) souligne la conception de l'oubli qui se définit au travers de cette modélisation, « ...il (l'oubli) est le négatif de la mémoire, il est une perte. ». L'interprétation associationniste de l'oubli renvoie à la détérioration quantitative et évaluable de la trace par un processus automatique de déclin ou d'effacement. La trace est envisagée comme une copie de la réalité qui se détériore en fonction du temps.

Par la suite, ce sont les conceptions structuralistes qui ont proposé des interprétations de l'oubli en fonction des registres de la mémoire : temporaire ou permanent. L'oubli en mémoire à court terme, en l'absence de répétitions, est aussi envisagé comme le déclin passif de la force des traces mnésiques (Tiberghien, 1997), et dans cette perspective, la quantité d'information rappelée est dépendante de la durée de l'intervalle de rétention. Par la suite cette interprétation s'est révélée insuffisante et c'est la capacité limitée de ce registre qui a été envisagée comme étant à l'origine de l'oubli. Waugh et Norman (1965) mettent en évidence que les performances mnésiques déclinent davantage en fonction du nombre d'items présentés, i.e. de la quantité d'information, qu'en fonction de l'intervalle temporel de rétention. Ce qui suggère que l'oubli en mémoire à court terme dépend davantage de la capacité de ce registre plutôt que du déclin passif de la trace.

Enfin, au niveau du registre de la mémoire à long terme, l'oubli a été principalement interprété comme la conséquence d'interférences (proactives ou rétroactives). L'oubli n'est

pas lié à un déclin de la trace mais à l'incapacité d'accéder à l'information stockée en mémoire à long terme (Baddeley, 1992).

Ces interprétations de l'oubli appartiennent à l'approche dite de l'entrepôt (Koriat *et al.*, 2003), le fonctionnement de la mémoire est envisagé comme codant les informations sous la forme de représentations mnésiques au contenu fixe qui sont ensuite stockées, l'oubli se manifeste dans les rappels par l'absence d'une partie ou de la totalité des éléments mémorisés.

L'approche dite de correspondance évalue les performances mnésiques de manière qualitative, le plus souvent en termes d'exactitude. Les défaillances de la mémoire s'expriment dans les distorsions, c'est à dire au travers des modifications du contenu des rappels. La question de l'oubli est envisagée sous ses aspects qualitatifs par Bartlett (1932) et dans une perspective bien différente, par la théorie de la Gestalt.

Dans cette approche, la mémoire n'est plus considérée comme une structure passive de conservation mais comme une fonction active de reconstruction du passé. Bartlett (1932) voit dans les distorsions l'expression du fonctionnement restructuratif de la mémoire humaine. L'oubli n'est plus compris comme un phénomène négatif (Cazayus, 2004) mais comme l'expression du fonctionnement normal de la mémoire.

La théorie de la Gestalt envisage l'oubli ou les distorsions comme un réaménagement, une restructuration de l'information. Cette conception aprioriste est un peu à part, en raison de sa perspective positive de l'oubli (Cazayus 2004).

Ces dernières conceptions, bien qu'étudiant l'oubli ou les distorsions au travers du temps, ne considèrent pas le temps comme la seule variable causale de ce phénomène. Le temps est surtout la dimension nécessaire à son expression. Les manifestations de l'oubli ou des distorsions sont essentiellement comprises comme le résultat du fonctionnement de la mémoire (Schacter, 1996).

Brun (1989) aborde la mémoire au travers des souvenirs, qu'il considère comme les objets de la mémoire, et précise les relations qui existent entre la dimension temporelle et les souvenirs. « La mémoire est une fonction qui se manifeste dans une expérience situationnelle dont une des caractéristiques fondamentales est le temps. Le temps marque la fixation et le défaut de fixation. Il permet aux capacités mentales et sensorielles de construire le souvenir. C'est ce même facteur temps qui [...] permet la conduction de la déformation du deuxième souvenir au moment du rappel spontané. Dans le cas d'une non déformation nous avons affaire à l'apprentissage, que je distingue radicalement de la mémoire. » (Brun, 1989, p. 125).

Cet auteur présente le temps comme la variable permettant l'expression de la fixation ou de la déformation des souvenirs.

Nous avons tenté d'étudier les deux « devenirs possibles » d'un souvenir proposés par Brun (1989) : la déformation et la non déformation. Pour cet auteur, le souvenir qui n'est pas déformé à l'issue d'un intervalle de rétention est considéré comme le fruit d'un apprentissage, tandis que le souvenir déformé après un intervalle de rétention manifeste l'expression du phénomène d'oubli ou de distorsion ; on peut en déduire que ce souvenir a été mémorisé mais pas soumis à un apprentissage.

Précédemment, nous avons mis en évidence deux conditions d'élaboration d'une représentation visuo-motrice en mémoire. La première condition est la construction d'une représentation mnésique au travers d'un processus de migration, qui conduit à la stabilisation des rappels près de la cible, caractérisant un état de connaissance (P1, P2). La seconde condition est la stabilisation du contenu de la représentation mnésique loin de la cible, succédant à un processus de distorsion généré par le rappel sériel en l'absence d'apprentissage préalable (P3, P4, P5).

La mise en place d'une tâche de rétention à l'issue de l'élaboration d'une représentation visuo-motrice en condition de migration ou de distorsion nous permettrait

d'étudier l'effet de l'intervalle temporel au niveau de : i) l'exactitude des rappels, c'est-à-dire d'étudier le niveau d'exactitude avant et après l'intervalle de rétention, ii) la dynamique des rappels, au travers de l'analyse des séries temporelles de l'exactitude dans la tâche de rétention.

Les tests de rétention sont classiquement utilisés pour tester les effets du temps sur les aspects quantitatifs ou qualitatifs des rappels. L'étude ajoutée de la dynamique des rappels dans la tâche de rétention permet d'envisager les effets de l'intervalle de rétention sur le niveau de stabilité du processus de rappel.

Dans le cadre de l'étude du niveau d'exactitude après un intervalle de rétention, nous faisons l'hypothèse que les effets du temps se manifesteront principalement en fonction du niveau d'élaboration du souvenir et non pas simplement en fonction des conditions, comme le suggère Brun (1989). En d'autres termes, nous faisons l'hypothèse que les effets de l'intervalle de rétention seront dépendants des propriétés de stabilité acquises par la représentation visuo-motrice lors de son élaboration. Lorsque le souvenir sera constitué au travers d'un processus de migration (mémorisation + apprentissage), nous pensons que l'intervalle de temps n'aura pas d'incidence sur le niveau de performance, comme cela a été suggéré par Brun (1989). La fin de l'apprentissage est marqué par un niveau de stabilité élevé des rappels, caractérisant l'état de connaissance et modélisé par un modèle de Bruit Blanc. L'atteinte de cet état stable pourrait prévenir de la détérioration du contenu.

Lorsque le souvenir sera construit au travers d'un processus de distorsion (mémorisation), nous faisons l'hypothèse que le niveau d'exactitude lors de la tâche de rétention sera préservé lorsqu'un état stable de distorsion aura été observé avant l'intervalle de rétention ; par contre, en l'absence de l'atteinte d'un état stable de distorsion, nous pensons que l'exactitude sera détériorée dans les rappels.

Enfin, l'étude de la dynamique des rappels de la tâche de rétention renvoie à interroger les effets de l'intervalle de rétention sur la dynamique des rappels. L'idée est que l'intervalle de rétention ne va pas modifier le niveau d'exactitude, c'est-à-dire le contenu de la représentation visuo-motrice mais le niveau de stabilité de la représentation, qui engendrerait lors de sa réactualisation successive une nouvelle dynamique.

Enfin, la reproduction sérielle de la séquence de mouvements dans la tâche de rétention devrait conduire à (re)stabiliser le contenu en mémoire, cette stabilisation s'observera au travers de la modification de la structure de la série temporelle en faveur d'un modèle de Bruit Blanc.

III. 1. Méthode

✓ Sujets

Douze sujets droitiers, de sexe féminin, participent à cette expérience. Le but de la tâche est de reproduire de mémoire, le plus précisément possible, une séquence de mouvements du bras droit. Les sujets sont répartis aléatoirement dans les deux groupes P6 et P7

✓ Procédure

Temps 1 : Première tâche de rappel

La familiarisation consiste à observer la séquence « cible » deux fois successivement. Les six sujets du groupe P6 rappellent la séquence 30 fois avec une présentation de la cible puis 20 fois sans nouvelle présentation. Les six sujets du groupe P7 voient la séquence « cible » une fois, puis rappellent la séquence 50 fois sans nouvelle présentation.

Temps 2 : Deuxième tâche de rappel après un intervalle de rétention de 24h

Les sujets du groupe P6 et P7 rappellent 100 fois la séquence sans nouvelle présentation de la cible.

L'ensemble de la procédure d'acquisition des données et du traitement des données est identique aux protocoles précédents.

✓ Analyse des données

Les séries temporelles de l'exactitude sont analysées à l'aide des modèles ARIMA (Box & Jenkins, 1976) sur les séries temporelles de T1 sur 50 essais.

L'étude de l'évolution de la structure des séries temporelles est réalisée sur des séries de 30 points décalées à pas de 10 pour T1 et sur des séries de 50 points décalées à pas de 10 pour T2.

24 h

III. 2. Résultats

La figure 11 présente quatre séries temporelles de l'exactitude des rappels pour deux
T1 T2
sujets de chaque groupe.

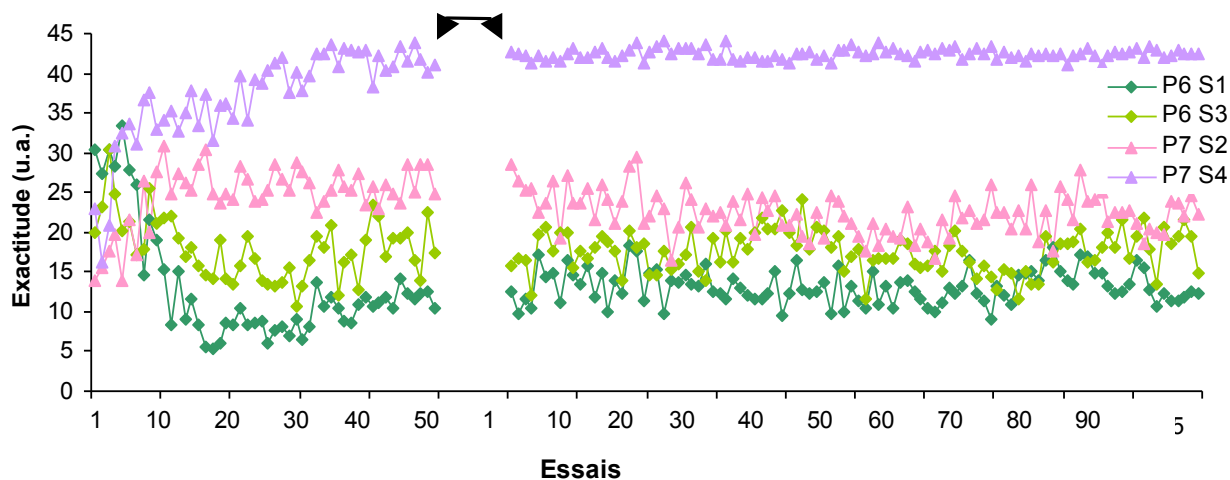


Figure 11 : Séries temporelles de l'exactitude de 2 sujets du groupe P6 et du groupe P7. Au temps T1, les sujets de P6 sont en situation de migration et ceux de P7 en situation de distorsion, 24 heures après au temps T2 les sujets de P6 et P7 rappellent 100 fois la séquence sans présentation de la cible.

III. 2. 1. Analyse des séries temporelles de T1 sur 50 essais

L'analyse des 6 séries temporelles du groupe P6 met en évidence un modèle autorégressif à un terme avec constante pour 5 sujets et sans constante pour 1 sujet. L'analyse des séries temporelles du groupe P7 met en évidence un modèle de moyenne mobile à un terme avec un terme de différenciation pour les 6 sujets (tableau 11)

T1	P6	P7
S1	AR(1)	MA(1)D(1)
S2	AR(1) + Cste	MA(1)D(1)
S3	AR(1) + Cste	MA(1)D(1)
S4	AR(1) + Cste	MA(1)D(1)
S5	AR(1) + Cste	MA(1)D(1)
S6	AR(1) + Cste	MA(1)D(1)

Tableau 11 : Les modèles ARIMA obtenus pour les séries temporelles des groupes P6 et P7 au temps T1.

III. 2. 2. Analyse de l'évolution des séries temporelles de T1

L'étude de l'évolution de la structure des séries met en évidence que tous les sujets n'ont pas atteint un état stable à l'issue des 50 essais. Dans le groupe P6, 3 sujets ont atteint un état de connaissance près du modèle (S3, S4, S5) et, dans le groupe P7, 4 sujets (S2, S3, S5, S6) ont atteint un état stable de distorsion (tableau 12)

P6	1.30	11.40	21.50
S1	AR(1)	BB	AR(1) + Cste
S2	AR(1)	AR(1)	AR(1) + Cste
S3	AR(1)	BB	BB
S4	AR(1) + Cste	AR(1) + Cste	BB
S5	AR(1) + Cste	AR(1) + Cste	BB
S6	AR(1) + Cste	AR(1) + Cste	AR(1) + Cste
P7	1.30	11.40	21.50
S1	MA(1)D(1)	BB	MA(1)D(1)
S2	MA(1)D(1)	BB	BB
S3	MA(1)D(1)	BB	BB
S4	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)
S5	MA(1)D(1)	BB	BB
S6	MA(1)D(1)	MA(1) + Cste	BB

Tableau 12 : Les modèles ARIMA obtenus pour les séries temporelle de 30 points décalées à pas de 10 des groupes P6 et P7 au temps T1

III. 2. 3. Analyse de l'évolution des séries temporelles de T2

L'analyse des séries temporelles sur 50 points décalées à pas de 10, met en évidence pour les sujets du groupe P6 des successions et des alternances de modèles de Bruit Blanc et de Moyenne mobile. Trois sujets présentent lors des 50 premiers essais un modèle de Bruit Blanc auquel succède, à des intervalles très différents, un modèle de Moyenne Mobile avec Différenciation (S1, S3, S4). Deux sujets présentent la succession de modèles de Moyenne Mobile avec Constante et de modèle de Bruit Blanc (S2, S5). Et un sujet (S6) présente une alternance de ces trois modèles (tableau 13)

P6	1 . 50	11 . 60	21 . 70	31 . 80	41 . 90	51 . 100
S1	BB	BB	BB	BB	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)
S2	MA(1) + Cste	BB	BB	BB	BB	BB
S3	BB	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)
S4	BB	BB	BB	BB	BB	MA(1)D(1)
S5	MA(1) + Cste	MA(1) + Cste	MA(1) + Cste	MA(1) + Cste	BB	BB
S6	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	BB	BB	MA(1) + Cste
P7	1 . 50	11 . 60	21 . 70	31 . 80	41 . 90	51 . 100
S1	BB	BB	BB	BB	BB	BB
S2	MA(1)D(1)	BB	BB	BB	BB	BB
S3	MA(1)D(1)	BB	BB	BB	BB	BB
S4	BB	BB	BB	BB	BB	BB
S5	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	BB	BB	BB	BB
S6	BB	BB	BB	BB	BB	BB

Tableau 13 : les modèles ARIMA obtenus pour les séries temporelles de 50 points décalés à pas de 10 des groupes P6 et P7 au temps T2

L'analyse de l'évolution des séries des sujets du groupe P7, met en évidence la succession de modèles de Moyenne Mobile avec Différenciation (MA(1)D(1)) et de modèles de Bruit Blanc (BB) pour 3 sujets (S2, S3, S5) et des états stables de distorsion sur les 100 essais pour trois sujets modélisés par un modèle de Bruit Blanc (BB) (S1, S4, S6). D'une manière générale, si le modèle de Moyenne Mobile (MA(1)D(1)) semble perdurer pour la majorité des sujets du groupe P6, les sujets du groupe P7 basculent massivement et précocement vers un modèle de Bruit Blanc.

III. 2. 4. Etude des niveaux d'exactitude

Nous avons moyenné les 10 dernières valeurs d'exactitude des séries temporelles de T1 et les dix premières valeurs d'exactitude de T2, et nous avons réalisée une ANOVA à deux facteurs Groupe (2) X Temps (2), avec une mesure répétée sur le second facteur, afin de comparer le niveau de performance avant et après l'intervalle de rétention. L'ANOVA met en évidence un effet principal du facteur groupe ($F_{1,10} = 10.17, p < .05$). Tous temps confondus, le groupe P6 présente une moyenne inférieure à celle du groupe P7 (15.17 vs 27.54). L'effet simple du facteur temps n'est pas significatif ($F_{1,10} = 0.77, NS$). On obtient par contre un effet d'interaction Groupe X Temps ($F_{1, 10} = 6.19, p < .05$). Un test post-hoc LSD indique que du temps T1 au temps T2, la moyenne du groupe P6 ne varie pas de manière significative. Par contre, la moyenne du groupe 7 diminue de manière significative (28.40 vs 26.67, $p < .05$) (figure 12)

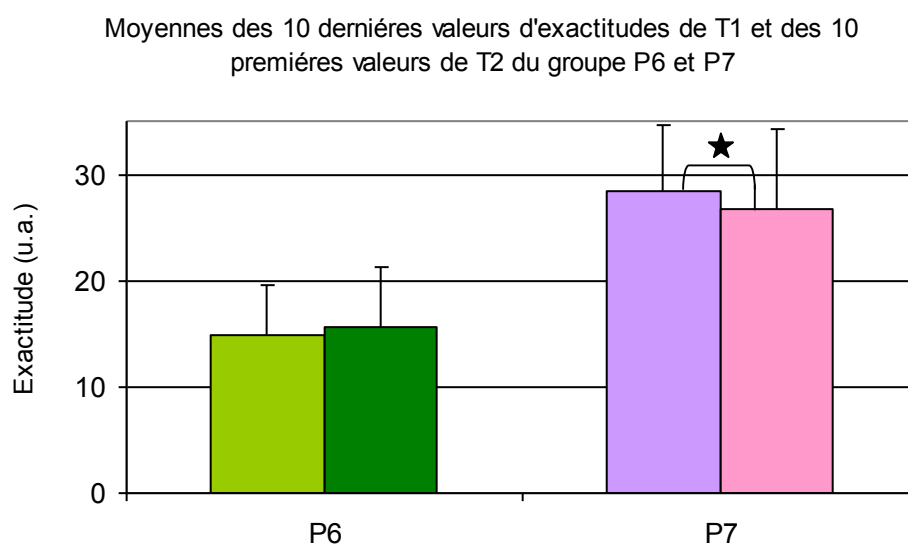


Figure 12 : Moyennes de l'exactitude des 10 derniers rappels de T1 et des 10 premiers rappels de T2 pour le groupe P6 et P7.

(★ différence significative à .05 des moyennes entre T1 et T2 pour le groupe P7)

III. 2. 5. Etude de la succession des modèles

Pour P6, toutes les successions envisageables sont présentes, par contre, on relève dans le groupe P7, 3 sujets pour lesquels succède à un état de stabilité un processus de distorsion (S2, S3, S5), 2 sujets pour lesquels succède à un processus de distorsion un état de stabilité (S1, S4), et un sujet qui présente un état stable de connaissance de part et d'autre de l'intervalle de rétention (tableau 14)

	T1	T2
P6	21.50	1 . 50
S1	AR(1) + Cste	BB
S2	AR(1) + Cste	MA(1) + Cste
S3	BB	BB
S4	BB	BB
S5	BB	MA(1) + Cste
S6	AR(1) + Cste	MA(1) + D(1)
P7	21.50	1 . 50
S1	MA(1)D(1)	BB
S2	BB	MA(1)D(1)
S3	BB	MA(1)D(1)
S4	MA(1)D(1)	BB
S5	BB	MA(1)D(1)
S6	BB	BB

Tableau 14 : les modèles ARIMA pour les séries temporelles du derniers intervalles de T1 et du premier intervalle de T2

III. 3. Discussion

Ce protocole visait à mettre en évidence l'effet de l'intervalle de rétention sur le niveau de performance et sur la stabilité des états des connaissances précédemment acquis. Nous faisons l'hypothèse que les effets de l'intervalle de rétention s'exprimeraient sur la structure de la série temporelle de la tâche de rétention par une perte temporaire de la structure de stabilité, modélisée par un modèle de Bruit Blanc, en faveur d'un modèle de structure moins stable. Contrairement aux analyses classiques qui centrent leur intérêt sur les différences de performance avant et après l'intervalle de rétention, notre étude se centre sur la structure du processus sous-tendant les rappels dans la tâche de rétention.

Les résultats obtenus ne vont pas dans le sens de nos attentes ; de plus ils sont marqués par des différences interindividuelles importantes. Nous discuterons les résultats du groupe P6 puis du groupe P7 avant de conclure de manière plus générale sur ce protocole.

III. 3. 1. Discussion P6

Dans la tâche T1, les sujets de P6 n'atteignent pas un état stable de connaissance du modèle aussi rapidement et dans une proportion de sujets équivalente aux groupes P1 et P2, que nous avons comme référence (cf. tableau XX). Pour les groupes P1 et P2, 10 sujets sur 12 présentaient un modèle de Bruit Blanc dès les séries de points 11 . 40, soit au deuxième décalage. Dans ce dernier protocole seuls 3 sujets présentent un modèle de Bruit Blanc lors de leur 30 derniers essais (P6 S3, S4, S5), c'est-à-dire des points 21 . 50, équivalent au troisième décalage. Les trois autres sujets maintiennent un modèle Autorégressif $AR(1) + Cste$, l'apprentissage n'est pas achevé.

Dans la tâche T2, l'analyse de l'évolution des structures des séries temporelles met en évidence des successions de modèles de Moyenne Mobile ($MA(1)D(1)$, $MA(1) + Cste$ et de Bruit Blanc dans les deux ordre de successions à des moments très variés, pour 5 sujets (P6 S1, S2, S3, S4, S5). Un dernier sujet présente une alternance de ces trois modèles :

MA(1)D(1) - BB - MA(1) + Cste. La diversité de ces résultats ne permet pas de généraliser ou d'identifier une dynamique représentative de l'activité spécifique engendrée par la tâche de rétention 24 heures après l'apprentissage.

Enfin, la comparaison du niveau de performance avant et après l'intervalle de rétention ne met pas en évidence de différence significative entre les derniers rappels de T1 et les premiers rappels de T2 et l'étude de la structure des séries temporelles après l'intervalle de rétention, comparée à la structure des séries temporelles avant cet intervalle, ne permet pas une généralisation d'un effet de la rétention sur la structure du processus qui sous-tend les rappels. On relève que 5 sujets sur 6 présentent un modèle stationnaire (BB ou MA(1) + Cste) pour les séries des premiers points de T2, l'intervalle de temps a des effets variés sur le niveau de stabilité du contenu en mémoire, puisque ces modèles stationnaires succèdent aussi bien à des états de connaissance qu'à des processus de mémorisation.

Nos résultats sont généralisables au niveau des modèles obtenus en fonction des conditions de réalisation de la tâche de rappel, et non au niveau des successions et des moments de succession. Le processus de migration est modélisé par un modèle Autorégressif à un terme AR(1) comme précédemment observé et les séries temporelles des rappels sans nouvelle présentation de la cible mettent en évidence principalement des modèles de Moyenne Mobile à un terme avec Différenciation (processus de distorsion) et des modèles de Bruit Blanc (état stable de connaissance ou de distorsion). Notre analyse rend compte davantage de la nature des comportements possibles et non pas de la temporalité d'apparition de ces comportements. En termes d'invariants, nous pouvons conclure sur la mise en évidence d'invariants fonctionnels en fonction des conditions de réalisation des tâches de rappels.

III. 3. 2. Discussion P7

Dans le groupe P7, les différences interindividuelles sont moins marquées. Dans la tâche T1, les intervalles des essais 31 . 50 de 4 sujets sur 6 sont modélisés sous la forme d'un état stable de distorsion, ce qui est proche des résultats obtenus pour le groupe P3 (Tableau XX, pp.). Et au temps T2, 3 séries temporelles présentent les propriétés d'un état stable de distorsion pour tous les intervalles de points modélisés et trois sujets présentent la succession d'un modèle de Moyenne Mobile avec Différenciation et d'un modèle de Bruit Blanc. De plus, cette succession se fait de manière assez homogène lors de l'intervalle des points 11 . 60 pour deux sujets et de l'intervalle 21 . 70 pour le troisième sujet.

Les successions des modèles avant et après l'intervalle de rétention ne permettent pas de généraliser un résultat ; par contre on peut relever une tendance qui consiste à faire succéder à un état de stabilité un processus de distorsion (3 sujets) et à un processus de distorsion un état de stabilité (2 sujets). Ce résultat, s'il se généralisait, argumente en faveur de l'idée que les effets du temps sont davantage fonction de l'état du souvenir (stable/instable) et ne sont pas univoques. L'ANOVA qui permettait de tester les niveaux d'exactitude avant et après l'intervalle de distorsion met en évidence une diminution significative des valeurs de l'exactitude après l'intervalle de rétention pour ce groupe.

III. 3. 3. Discussion générale

Les études sur l'oubli et les distorsions ont mis en évidence un certain nombre de facteurs dont dépendent les modalités d'apparition de ces phénomènes. Nous avons, dans notre étude, tenté de synthétiser les variables qui contribuent à l'apparition de distorsions.

- les conditions de réalisation des tâches de rétention déterminent en partie le devenir des souvenirs. L'absence de présentation de la cible, c'est à dire l'absence de renforcement, ainsi que l'absence de connaissance du résultat favorisent certainement l'émergence de processus de distorsion, ou tout au moins elles ne permettent pas le maintien du bénéfice de l'apprentissage pour le groupe P6.

- dans une précédente discussion du processus de distorsion, nous avons rappelé l'hypothèse proposée par Giraudo et Pailhous (1999) pour en rendre compte. Ces auteurs suggéraient que les distorsions observées seraient l'expression de la dynamique intrinsèque du patron moteur (Shöner & Kelso, 1989). L'absence de contraintes environnementales, qui attirent les rappels vers la cible ou qui les maintient près de la cible, laisserait place à l'expression de la dynamique intrinsèque du patron, c'est-à-dire à la modification du patron vers une coordination préférentielle. L'expression de la dynamique préférentielle du patron moteur peut être envisagée comme une variable déterminant en partie l'apparition de distorsions ou d'oubli.

- le type de matériel à mémoriser fait partie des variables qui ont été explorées et les effets apparaissent particulièrement importants au niveau de la mémoire procédurale dans les savoir-faire moteurs. Notamment, on a observé que les habiletés motrices continues, comme par exemple le vélo, ne semblent subir aucun oubli, et à l'inverse que les apprentissages comme la dactylographie semblent soumis à un oubli rapide (Baddeley, 1992). Nous pensons que la motricité morphocinétique, de par ses caractéristiques « abstraites », arbitraires ou encore de « luxe », est propice aux distorsions et à l'oubli, de la même manière que l'étaient

les contes de Bartlett (1932) de part leurs liens causaux étranges. On peut envisager que la dynamique des fonctions de la mémoire soit en partie propre au type de matériel à mémoriser et, dans le cadre de l'apprentissage et/ou de la mémorisation de mouvements aux « types de patrons moteurs ». Si les patrons de locomotion ne présentent quasiment pas d'oubli, quelles sont les caractéristiques qui les préservent de ce phénomène ?

Les travaux modélisant les changements qualitatifs des patrons de coordinations cycliques rythmiques dans la cadre des théories de l'auto-organisation sont susceptibles de fournir des interprétations à ce sujet. Les mouvements cycliques, des plus simples (pointage alternatif, oscillations unimanuelles) aux plus complexes (locomotion, simulateur de ski) sont modélisés dans l'espace des phases sous la forme de cycles limites auto-entretenus (Kay, Saltzman, Kelso, & Shöner, 1987 ; Mottet & Bootsma, 1999 ; Nourrit, Delignières, Caillou, Deschamps, & Lauriot, 2003). Ces modèles suggèrent, de manière simplement exprimée, que ces patrons de coordination sont pourvus d'une « autonomie », qu'ils émergent et s'organisent d'après leurs lois propres (Beek & Beek, 1988 ; Kelso, 1995). Leur étude met en évidence qu'il n'est pas nécessaire de faire intervenir ou de modéliser « une instance supérieure » ordonnant l'initiation et le contrôle de ces patrons moteurs pour rendre compte de leur apparition et de leur organisation. Le patron émerge de l'interaction réciproque des contraintes environnementales et de l'état du système, et il se maintient au vue des évolutions qualitatives de ces mêmes variables.

Intégrés à une problématique d'oubli dans le domaine de la motricité, il nous semble que ces patrons pourraient constituer l'extrémité d'un continuum de patrons moteurs qui présenteraient des propriétés « d'auto-organisations » ou des propriétés « d'émergence », par opposition à l'autre extrémité de ce continuum, qui serait constitué de patrons pour lesquels les conditions d'apparition seraient fortement dépendantes des conditions et des propriétés de

réactualisation de la mémoire humaine, en d'autres termes des coordinations nécessitant un « guidage ».

Il se pourrait que ces patrons « émergents » ne dépendent pas ou uniquement dans une faible mesure des systèmes de mémoire : leurs propriétés d'auto-organisation ne feraient pas dépendre leur apparition/réactualisation des propriétés du système mnésique. Pour les patrons de locomotion des arguments d'ordres ontogénétiques et phylogéniques pourraient corroborer cette conception. Les partisans des perceptives évolutionnistes avancent que la compréhension pleine de la cognition et des comportements nécessite leur introductions dans les modèles (Schacter, 2003) A-t-on déjà oublié la marche ou la course en l'absence de pathologie ? Ne pourrait-on pas envisager que la patron de pédalage et celui de coordination bimanuelle partagent des propriétés essentielles, les préservant à leur tour massivement de l'oubli.

Par ailleurs, cela ne signifie pas que ces patrons ne sont pas en interactions avec la mémoire. La mémoire, comme fonction cognitive, peut « coopérer » ou au contraire « contraindre » l'émergence qualitative de certains patrons moteurs et permettre par exemple les pas de danse, le mime de marches stéréotypées ou encore l'apprentissage de nouveaux patrons de coordinations bimanuelles (90°, 135°) (Kostrubiec & Zanone, 2002). De même, il semblerait, à l'instar des coordinations bimanuelles, que des coordinations locomotrices apprises présentent ces propriétés, comme par exemple, au dire d'une danseuse et professeur, que le « pas de bourrée » une fois appris ne s'oublie pas. Bien évidemment, ces hypothèses nécessiteraient des investigations empiriques pour être explorées pour apporter des éléments de réponse. Enfin, pour conclure sur cette idée, il nous semble que cette perspective d'étude permettrait d'intégrer les travaux modélisant les apprentissages en l'absence de mémoire (perspectives areprésentationelle), au sens de médiation fonctionnelle (représentation) présentant les propriétés de déterminer en partie les sorties motrices. En effet, ces conceptions envisagent que les patrons sont mémorisés mais qu'ils ne sont pas dépendants d'une

réactualisation en mémoire. Les modèles d'équations non-linéaires proposent de tels types de modèles ayant des propriétés de mémoire non médiées (Kostrubiec, 2001 ; Kostrubiec & Zanone, 2002 ; Guillot & Daucé, 2002).

Si l'on peut envisager de nombreux facteurs susceptibles de pouvoir déterminer en partie les comportements observés et les différences interindividuelles, force est de constater que l'état de nos travaux ne nous permet pas d'avancer davantage dans la compréhension de ce phénomène.

Enfin, il est important de noter que les travaux récents qui ont étudié l'évolution des rétentions remettent en cause la courbe de l'oubli classique d'Ebbinghaus (Nicolas, 2000 ; Cazayus, 2004). Spear (1980) considère comme vaine toute tentative de considérer la courbe d'Ebbinghaus comme étant représentative de l'ensemble des relations possibles entre les performances de rappel et la durée de l'intervalle de rétention. Cazayus (2004) rapporte des travaux de ce même auteur en psychologie animale : « ... maints procédés techniques ont permis d'évaluer l'évolution de la rétention de façon de plus en plus précise et en des délais de contrôle bien plus nombreux et plus étendus. Il en est résulté une mise en évidence d'une variété remarquable de fonctions de rétention, les unes stables, à décélération régulière, mais d'autres irrégulières, sinon improbables et, en tout cas, nullement en accord avec la loi de l'oubli. » (Spear, 1980 cité dans Cazayus, 2004, p. 206-207). Loin de nous éclairer sur la compréhension des séries de distorsions que nous avons observées et de leurs différences interindividuelles, ces commentaires suggèrent un phénomène hautement complexe révélé par des comportements très variés, qui nous laisse penser que les courbes de rétention que nous avons obtenues en sont une expression.

De plus, à propos des processus de distorsion obtenus, il nous semble important de distinguer les processus de distorsion observés en l'absence de présentation suffisante de la

cible (P3, P4, P5, P7 T1) de ceux obtenus après l'atteinte d'un état stable (de connaissance ou de distorsion), que les rappels soient loin ou près de la cible (P6 T2, P7 T2). Bien que les conceptions de l'oubli soient issues de courant de recherche différents, elles ne s'invalident pas entre elles et semblent dépendantes essentiellement des conditions d'observation et des mesures. Il nous semble intéressant de distinguer ces deux conditions de distorsion au travers des différentes conceptions de l'oubli.

On peut envisager que la génération de distorsions par l'absence de présentation de la cible dépende d'une incapacité à stabiliser un contenu (cf. discussion P4 P5). Les sujets observent 3 fois successivement la séquence « cible » puis doivent la rappeler le plus précisément possible 50 ou 100 fois. On peut faire l'hypothèse qu'il existe en partie un déficit de la mémoire à court terme dans sa capacité de contenu, qui s'exprime dans cette situation étant donnée l'absence de présentation de la cible. A l'inverse, la génération de distorsions après un état stable de connaissance, et plus particulièrement après un apprentissage (P6), semble dépendre davantage du fonctionnement de la mémoire à long terme et de ses propriétés de réactualisation d'un souvenir (sa reconstruction).

Cette discussion nous renvoie aux deux conditions d'élaboration d'un souvenir : la situation de mémorisation seule ou la situation de mémorisation et d'apprentissage, pour lesquelles l'oubli ou les distorsions sont observés (P6 T2 et P7 T2). Ces résultats nous conduisent à reconsidérer les propositions de Brun (1989). Les devenir possibles d'un souvenir lors de sa réactualisation après un intervalle de rétention semble être multiples et pas seulement dépendants de leur condition d'élaboration.

Cette étude renvoie à deux conditions d'élaboration des souvenirs auxquelles tout homme est confronté. La plupart de nos souvenirs en mémoire ne sont pas les objets d'un apprentissage, bien au contraire la majorité d'entre eux n'est pas soumise à un contrôle lors de leur mise en mémoire (Loftus, 1997). L'analyse de l'évolution des rétentions en l'absence de

mémorisation suffisante renvoie au champ d'étude de la mémoire dans les témoignages visuels (Loftus, 1979) ou les paradigmes de faux souvenir (Roediger & MacDermott III, 1995). Ces travaux requestionnent des phénomènes de mémoire qui avaient été peu étudiés, mais dont l'intérêt a été motivé par l'importance sociale de faux témoignages dans les abus sexuel. Ainsi, l'étude de l'évolution des rétentions à l'issue d'un apprentissage renvoie aux problèmes de la perte des bénéfices de cet apprentissage, et à l'évaluation des connaissances passé un certain laps de temps, que de rares travaux ont essayé d'évaluer.

On retrouve ici la question présentée en introduction que posait Merce Cunningham s'interrogeant sur le réapprentissage par ses danseurs des séquences de mouvements de ballets anciennement créés et appris.

Expérience 2

L'étude précédente a permis d'envisager la dynamique d'un souvenir moteur suivant différentes modalités de rappels de la séquence de mouvements. Nous avons mis en évidence des relations complexes entre le temps, les conditions d'élaboration d'un souvenir, le niveau des performances de rappels et la structure des séries temporelles. Il apparaît que l'évolution des rétentions après un apprentissage se manifeste principalement par la perte des bénéfices de cet apprentissage. Cette évolution est modélisée par un processus de distorsion, qui apparaît à des temporalités très variées pour 4 sujets sur 6, après un intervalle de rétention de 24 heures. Nous envisageons ce processus de distorsion différemment de celui observé en l'absence d'apprentissage préalable. Le processus de distorsion qui apparaît après des états stables de connaissance nous semble dépendant du système de mémoire à long terme. De manière similaire aux autres processus mis en évidence dans les études précédentes, nous pensons qu'il est limité dans le temps, par conséquent qu'un nouvel état stable de connaissance devrait succéder à ce processus.

Par ailleurs, nous n'avons pas noté dans la littérature d'étude relative aux propriétés de cette évolution ; les attentions portées sur l'évolution des performances d'apprentissage à plus ou moins long termes visent principalement la compréhension des bénéfices de l'apprentissage massé *versus* distribué ou de la spécificité de la pratique (Badets, 2004 ; Robin, 2003).

Nous avons mis en place une deuxième tâche de rétention afin d'étudier les effets d'un long intervalle de rétention, en l'absence de réactualisation du souvenir « visuo-moteur ». Nous faisons l'hypothèse qu'un processus de distorsion devrait être observé dans la structure des séries temporelles, pour tout les sujets, révélant la perte des bénéfices de l'apprentissage et l'activité reconstructive de la mémoire.

T1

T2

T3

III. 4. Méthode

13 semaines

24 h

Pour cela nous avons (re)testé le groupe P6 sur une seconde tâche de rétention, 13 semaines après T1 et T2.

✓ Sujets

Les 6 sujets du groupes P6 ont participé à cette tâche. Les sujets pensaient participer à une nouvelle expérience.

100 1

Le but de la tâche est de rappeler la séquence initialement apprise 13 semaines avant le plus précisément possible.

✓ Procédure

Les sujets rappellent la séquence 100 fois sans nouvelle présentation du modèle.

L'ensemble de la procédure d'acquisition et du traitement des données est identique aux protocoles précédents.

Nous étudierons l'évolution de la structure des séries temporelles de rétention au travers de l'analyse des série temporelles de 50 points décalées à pas de 10.

III. 5. Résultats

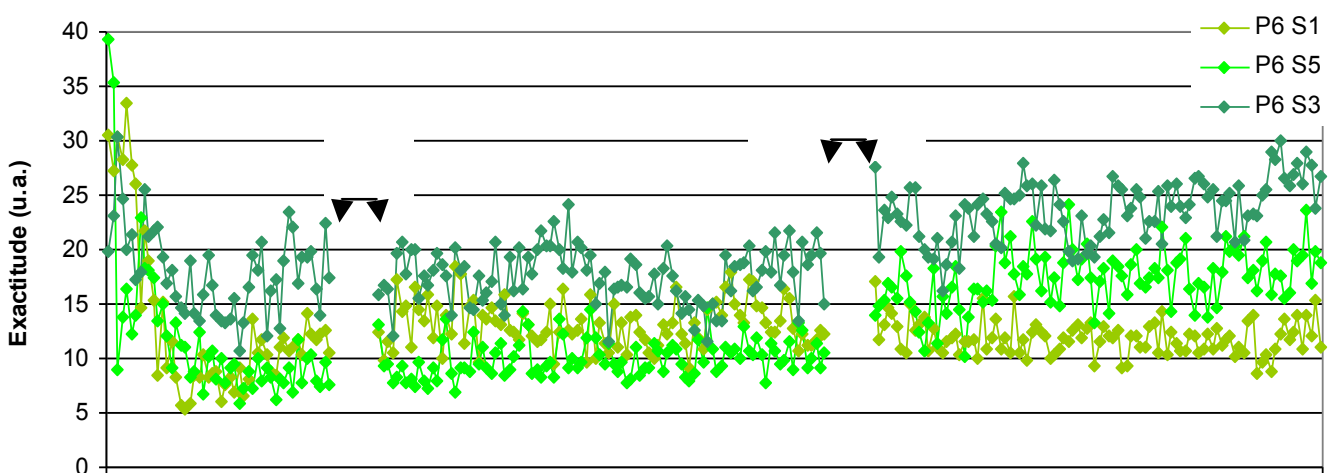


Figure 13 : Série temporelles de deux sujets de P6 aux temps T1 (Migration), T2 (Rétention à 24 heures), T3 (Rétention à 13 semaines)

L'analyse de l'évolution des séries temporelles de T3 (tableau 15) met en évidence que deux sujets sont à l'état stable de connaissance (S1, S4), les séries montrent pour tous les intervalles de points un modèle de Bruit Blanc. Un sujet présente une série modélisée par un processus de distorsion (Moyenne Mobile avec Différenciation, S3) et 3 sujets présentent des successions de modèles MA(1)D(1) ou MA(1) + Cste avec un modèle de Bruit Blanc (S2, S5, S6).

P6 T3	1 . 50	11 . 60	21 . 70	31 . 80	41 . 90	51 . 100
S1	BB	BB	BB	BB	BB	BB
S2	BB	BB	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)
S3	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)
S4	BB	BB	BB	BB	BB	BB
S5	MA(1) + Cste	MA(1) + Cste	BB	BB	BB	BB
S6	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	MA(1)D(1)	BB	BB	BB

Tableau 15 : Modèles ARIMA obtenus pour les séries temporelles de 50 points décalées à pas de 10, des sujets du groupe P6 au temps T3

III. 6. Discussion

Le but de ce protocole était de modéliser les comportements de sujets amenés à rappeler une séquence de mouvements apprise 13 semaines auparavant. Les résultats de cette tâche de rétention à long terme mettent en évidence des différences interindividuelles importantes. Ces résultats ne vont pas dans le sens de nos attentes. Nous envisagions une

manifestation pour tous les sujets de la perte des bénéfices de l'apprentissage au travers d'un processus de distorsion, puis une stabilisation des rappels à un nouvel état de connaissance.

Ces résultats au contraire supportent l'idée que les évolutions de rétention sont multiples, complexes; marquées par des différences individuelles importantes ; leur généralisation est par conséquent difficile. Ils nécessiteraient d'être davantage approfondis pour donner lieu à des interprétations précises, mais nous pouvons avancer, en l'état actuel de l'analyse, que certains sujets sont capables de rappeler de manière stable, et pour certains même précisément, la séquence de mouvements morphocinétiques. Ce dernier protocole nous permet néanmoins de mettre en évidence, pour un intervalle temporel plus long, la complexité et la diversité des évolutions des performances de mémoire en fonction du temps.

Il apparaît de l'ensemble de ces protocoles avec tâches de rétention que la réactualisation d'une séquence de mouvements morphocinétiques autrefois apprise semble sous la dépendance de processus complexes en interaction avec de nombreux facteurs. Ce travail ne nous permet pas, à l'heure actuelle, de conclure ; par contre, il nous semble qu'il offre un cadre d'étude pertinent pour de nouvelles investigations.

Nous synthétiserons dans la discussion générale les fonctionnements de la mémoire et leurs propriétés que nous avons mis en évidence dans les différents protocoles et nous présenterons quelques perspectives d'études susceptibles d'isoler et d'identifier la dynamique des interactions de certains facteurs avec le fonctionnement mnésique.

DISCUSSION GENERALE

L'étude originale que nous avons menée a été permise pour l'essentiel par l'apport conceptuel de l'approche fonctionnelle de la mémoire, un outil de modélisation - les modèles ARIMA - et le dispositif expérimental élaboré par Giraud et Pailhou (1999). Ceci nous a donné la possibilité d'effectuer des analyses en séries temporelles des évaluations qualitatives de reproductions sérielles de mouvements.

L'objectif premier de ce travail était la modélisation des propriétés des processus de mémoire au travers de leur expression au niveau de la dynamique comportementale. Il n'existe pas à l'heure actuelle un champ d'étude identifié en psychologie qui se centre sur cette problématique, c'est pourquoi nous avons « navigué » entre différentes approches. Nous partageons les perspectives théoriques de l'approche fonctionnelle (Nicolas, 2000) et de l'approche centrée sur l'exactitude de la mémoire (Koriat *et al.*, 2003). Nous possédons comme « dénominateur commun » avec les études sur la dynamique de la mémoire de nous centrer sur les changements qualitatifs des états du système dans le temps, et d'en inférer des propriétés du fonctionnement mnésique. Nous nous inscrivons dans une problématique actuelle de reconsidération de la variabilité (opérationnalisation, signification, propriétés, variabilité intra-individuelle et inter-individuelle). Enfin, nous sommes attachés aux problématiques sur la motricité morphocinétique, tant pour les problèmes appliqués de la pratique de la danse, que pour les propriétés de la motricité dont semble dépendre, du moins partiellement, le fonctionnement de la mémoire.

Nous avons mis en évidence deux conditions d'élaboration d'un souvenir en mémoire : par apprentissage et par la seule mémorisation. Nous distinguons ces deux conditions en fonction du contrôle des entrées en mémoire. En condition d'apprentissage, le

contenu mémorisé est proche du patron à apprendre, il y a un contrôle et une stabilisation du contenu de la représentation en mémoire. A l'inverse, lors de la seule mémorisation, les systèmes de mémoire à court terme ne peuvent prendre en charge la totalité des informations, les entrées en mémoire ne sont pas contrôlées.

L'élaboration d'une représentation visuo-motrice en mémoire en condition d'apprentissage est modélisée par un processus de migration (Giraudo & Pailhous, 1999). Ce processus rend compte de la « migration » du contenu de la représentation vers la cible, et est modélisé par un modèle ARIMA Autorégressif à un terme AR(1).

Le modèle AR(1) décrit de manière générale des oscillations de relaxation autour d'un attracteur point fixe. Plus simplement, ce modèle rend compte de la migration des rappels en direction de la cible. De plus, ce modèle présente une relation déterministe sur deux essais successifs. Nous avons interprété cette propriété du modèle comme étant l'expression d'un comportement exploratoire (Newell *et al.*, 1989), les rappels étant déterminés par ce qui a été précédemment acquis (représenté par l'essai précédent) et par le but à atteindre (représenté par l'attraction vers la cible). Cette interprétation est éloignée de la conception d'un apprentissage progressif, de la construction d'une référence, évoluant lentement au cours des essais.

Cazayus (2004) rapporte une conception similaire de l'apprentissage. Rock (1957, cité dans Cazayus, 2004) s'intéresse au processus d'acquisition oeuvrant lors de la répétition des présentations des couples composants une liste à apprendre. Les couples sont constitués de deux lettres associées à un nombre. Deux hypothèses sont proposées qui s'affrontent : l'une qui envisage que chaque répétition sert à renforcer la trace, ce qui suggère une acquisition graduelle, et à l'inverse, l'autre propose que chaque présentation permet l'acquisition d'un nouvel élément, jusqu'à l'acquisition de tous les éléments (pour détails Cazayus, 2004, p. 144). Bien que la procédure du protocole expérimental soit critiquée (Cazayus, 2004), les

résultats sont en faveur de la seconde hypothèse, c'est-à-dire contre la perspective d'un apprentissage graduel. Ce résultat suggère que l'acquisition se fait par la répétition de l'acte d'apprendre jusqu'à ce que l'apprentissage soit complet et non par la répétition des éléments à apprendre (approfondissement de la trace).

La seconde condition d'élaboration d'une représentation visuo-motrice a été mise en évidence au travers d'un processus de distorsion. Cette condition peut être qualifiée de mémorisation seule, en référence au fait que le contenu mis en mémoire n'est pas contrôlé au regard de sa source. En l'absence de la présentation suffisante de la cible pour conduire à un apprentissage, les rappels sériels de la séquence de mouvement sont générés par un processus de distorsion. Ce processus suggère une activité reconstructive de la mémoire. La mémorisation partielle des éléments de la séquence motrice conduit, lors de sa réactualisation, à la « reconstruire » sur la base des éléments de la cible mémorisés et des connaissances plus générales à propos des mouvements du bras. Lorsque la séquence doit être répétée, les reconstructions successives conduisent à une évolution de son contenu. Ce fonctionnement est mis en évidence par un modèle de Moyenne Mobile à un terme avec Différenciation. Ce modèle rend compte de l'évolution lente d'une référence sous l'effet de deux processus. Le premier processus corrige des erreurs aléatoires qui ont entachées la production de la séquence, le second tend à intégrer des erreurs à la référence, il la modifie. Ce second mécanisme d'intégration d'erreurs évoque le modèle de Semon (date ?) qui suppose que toute réactualisation d'un souvenir (sa production) génère son réencodage, et par conséquent intègre des modifications qui se manifesteront lors de la réactualisation suivante.

Enfin, à ces deux processus d'élaboration succèdent des états stables de connaissance ou de distorsion. Ces états stables sont la signature de la stabilisation / consolidation en

mémoire du contenu de la représentation visuo-motrice et ils sont représentés par un modèle de Bruit Blanc. Le modèle de Bruit Blanc suggère que les performances pour un intervalle temporel considéré ne sont plus fonction du temps, elles sont identiquement et indépendamment distribuées autour d'une valeur. Cette valeur témoigne de la représentation visuo-motrice stabilisée, la distribution des performances autour de la valeur observée est l'expression de l'erreur aléatoire qui entache l'exécution motrice. Nous avons précédemment discuté le fait que ce modèle ne pouvait pas avoir une existence physique, mais qu'il devait être considéré comme limité dans le temps, c'est-à-dire comme le modèle qui, pour un intervalle de temps considéré, représente le mieux les propriétés de la distribution des rappels. L'acceptation de ce modèle comme un fonctionnement permanent de la mémoire supposerait que toutes les connaissances consolidées en mémoire à long terme sont stockées de manière intacte et par conséquent ne seraient plus susceptibles d'être oubliées dans le futur. Or de telles connaissances semblent être rares et dépendantes de nombreux facteurs autres que la seule condition de stabilisation / consolidation. Ce modèle suggère que la mémoire « reproduit », que la connaissance est tellement stable que sa réactualisation consiste à une reproduction, à « un rappel par cœur ». Il s'oppose donc clairement aux conceptions envisageant le fonctionnement de la mémoire comme une reconstruction active.

Enfin, à ces deux processus d'élaboration succèdent des **états stables de connaissance ou de distorsion**. Ces états stables sont la signature de la stabilisation / consolidation en mémoire du contenu de la représentation visuo-motrice et ils sont représentés par un **modèle de Bruit Blanc**. Le modèle de Bruit Blanc suggère que les performances pour un intervalle temporel considéré ne sont plus fonction du temps, elles sont identiquement et indépendamment distribuées autour d'une valeur. Cette valeur représente la représentation visuo-motrice stabilisée, la distribution des performances autour est l'expression de l'erreur

aléatoire qui entache l'exécution motrice de la séquence. Nous avons précédemment discuté le fait que ce modèle ne pouvait pas avoir une existence physique, mais qu'il devait être considéré comme limité dans le temps, c'est-à-dire comme le modèle pour un intervalle de temps considéré représentant au mieux les propriétés de la distribution des rappels. L'acceptation de ce modèle comme un fonctionnement de la mémoire supposerait que toutes les connaissances consolidées (à un moment donné) en mémoire à long terme, sont stockées de manière permanente et ne seraient plus susceptibles d'être oubliées dans le futur. Or de telles connaissances semblent être rares et dépendantes de nombreux facteurs autres que la seule condition de stabilisation / consolidation en mémoire. **DEJA DIT DANS LE PARAGRAPHE PRECEDENT** Enfin, ce modèle suggère que « la mémoire reproduit », par opposition aux conceptions qui envisagent le fonctionnement de la mémoire comme une reconstruction active. Ce modèle exprime clairement que la connaissance a atteint une telle stabilité que sa réactualisation consiste à une reproduction, à « un rappel par cœur ».

A l'issue de ces modélisations, que nous jugeons satisfaisantes, de l'élaboration d'une représentation visuo-motrice en mémoire, nous nous sommes intéressés à la **dynamique de ces souvenirs**, en d'autres termes au devenir de ces représentations visuo-motrices dans le temps. **L'oubli** apparaît comme une issue très probable au devenir d'un souvenir, c'est à dire comme une dynamique possible de ce phénomène. Or, il est difficile d'étudier l'oubli d'un souvenir car l'évocation même du souvenir le renforce et par conséquent ralentit ou ne permet pas l'expression de détériorations. Une alternative est l'étude de **l'évolution des rétentions**, où l'on évalue la qualité ou la quantité des rappels après un intervalle de temps.

L'étude des rétentions en fonction des conditions d'élaboration du souvenir renvoie à deux phénomènes auxquels nous sommes tous confrontés : le premier renvoie à la perte des bénéfices d'un apprentissage après un certain laps de temps et en l'absence de réactualisation

et/ou de renforcement de ce souvenir ; le second fait référence au souvenir élaboré alors qu'il n'y a pas eu d'encodage répété, comme par exemple nos souvenirs épisodiques, et à leur devenir notamment en terme de stabilisation ou de distorsion. L'étude de l'évolution des rétentions s'est révélée complexe et non uniforme, nous avons mis en évidence des dynamiques plurielles.

En synthétisant les résultats, on peut dire que les rétentions à 24 heure **d'un souvenir élaboré par apprentissage**, de manière générale, mettent en évidence des alternances d'état stable de connaissance et de processus de distorsion. Ceci suggère une perte des bénéfices de l'apprentissage qui s'exprime au travers de l'apparition d'un processus de distorsion. Cette dynamique indique qu'il y a une perte (temporaire) des propriétés de stabilité de la représentation visuo-motrice en mémoire, qui a pour conséquence de ne plus permettre une activité « reproductive » (processus de Bruit Blanc), et qui conduit à la mise en œuvre d'une activité reconstructive générant des distorsions. Nous considérons ce résultat comme la modélisation d'une forme d'oubli, dépendante des propriétés de la représentation et des systèmes de mémoire à long terme. L'étude des rétentions à l'issue d'un intervalle temporel de 13 semaines met en évidence une individualisation des dynamiques : i.e. les dynamiques sont plus homogènes, elles sont soit stationnaires soit de distorsion.

L'étude de l'évolution des rétentions à 24 heures d'un **souvenir mémorisé mais non appris** met en évidence des réminiscences qui s'expriment par une amélioration des niveaux d'exactitude. Ce phénomène, que nous n'attendions pas, est fréquemment rapporté dans la littérature, et corrobore l'idée que le temps qui passe n'amène pas que des dégradations et de l'oubli. Bien au contraire, nos résultats ne nous ont pas conduit à mettre en évidence, toutes rétentions confondues, une détérioration du contenu avec le temps, il n'y a pas de forme d'oubli liée à la seule variable temps. Les rétentions montrent des dynamiques de stabilisation ou une succession d'un processus de distorsion et d'états stables de distorsion. Ces derniers

peuvent être compris comme l'expression déjà rapportée par Bartlett (1932) d'une diminution de l'apparition des distorsions au cours des rappels successifs et d'une stabilisation de ces rappels, c'est-à-dire pour des variations mineures et aléatoires.

L'ensemble de ces résultats nous conduit à conclure que les rétentions sont complexes, « ...multiphasiques, caractérisées par des fluctuations nettes, souvent rythmiques de la rétention : fluctuations hautement corrélées avec des changements d'activités... » (Spear, 1980, cité dans Cazayus, 2004, p 207). Les différences interindividuelles participent à la complexité des phénomènes. Willems et Van der Linden (2004, p. 94) rapportent que l'étude des différences interindividuelles dans les paradigmes de faux souvenirs met en évidence que les relations entre les caractéristiques individuelles, l'exactitude des rappels ou des témoignages et la manipulation des variables favorisant les faux souvenirs « sont à la fois extrêmement complexes et peu consistantes » . Nous avons, dans des précédentes discussions, soulevé l'éventualité du rôle de certains facteurs dans l'expression des dynamiques comportementales.

Toutefois, il nous semble essentiel de souligner un résultat remarquable du point de vue de sa consistance, qui par ailleurs était loin d'être acquis par avance, c'est le type de modèle obtenu en fonction des conditions de réalisation de la tâche de rappel. Les conditions d'apprentissage ont toutes donné lieu à des modèles Autorégressifs à un terme, les conditions de mémorisation en l'absence de la présentation suffisante de la cible ont mis en évidence un modèle de Moyenne Mobile à un terme avec Différenciation, et l'étude de l'évolution des rétentions a mis en évidence des alternances de modèle de Moyenne Mobile avec Différenciation et de modèles stationnaires, modèle de Bruit Blanc et de Moyenne Mobile à un terme avec Constante. Nous interprétons cette consistance comme la mise en évidence

d'invariants fonctionnels, c'est à dire l'observation de fonctionnements adaptés aux contraintes.

Enfin pour conclure, nous reprendrons les propos de Dérouesné et Spire (2002, p.) pour lesquels nous pensons que nos travaux sont une modeste tentative de mise en évidence empirique : « Le souvenir est une représentation transitoire, reconstruite et maintenue avec effort dans la conscience. La réactualisation du souvenir du même événement en induit de multiples versions, puisque le souvenir est reconstruit à chaque fois [...]. La représentation en mémoire d'un souvenir est dynamique ... »

D'un point de conceptuel et méthodologique, il nous semble important de conclure sur l'intérêt de l'approche dynamique et de la modélisation des séries temporelles à l'aide des modèles ARIMA (Box & Jenkins, 1976). Il ne fait aucun doute que les postulats de l'approche dynamique des systèmes complexes auto-organisés sont essentiels à la modélisation du fonctionnement, lui-même complexe, du comportement humain ; ils nous préservent aussi des travers de certains modèles trop prescriptifs de type computo-symbolique. L'approche dynamique suggère que les états internes varient sans intervention extérieure, cela fait référence à la loi locale ou à la dynamique interne des différents éléments composants le système et permet de penser qu'un souvenir posséderait des propriétés dynamiques propres. De plus, l'étude de la dynamique de séquences de comportements complexes met en évidence qu'ils sont dépendants des conditions initiales, i.e. l'expression d'un souvenir est largement dépendante de ses conditions d'élaboration. Mais l'approche dynamique suggère aussi que la dynamique propre d'un souvenir devrait être modifiée, dès lors qu'elle sera en interaction avec d'autres éléments constituant le système. Une illustration simple de cette idée est l'interaction produite par le changement de la dynamique environnementale, qui consistait à présenter systématiquement la cible, sur la dynamique du

souvenir (cf. P3, p. XX). En d'autres termes, des situations dont les contraintes environnementales conduiraient à des interférences, à son évocation, à son renforcement, à sa reconnaissance, à son rappel, à sa suggestion devraient profondément modifier la dynamique de ce même souvenir. Enfin, dans le cadre de l'étude de la dynamique d'un souvenir moteur, nous pensons que la dynamique intrinsèque du patron de coordination est aussi à prendre en compte et détermine en partie et en interaction la dynamique de ce souvenir. Cette approche nous offre incontestablement des perspectives d'étude, puisque, *a priori* la manipulation de ces variables précédemment citées, dans le cadre d'un protocole de reproductions sérielles, devrait permettre l'observation et la modélisation des interactions.

Par contre, il nous semble important de noter que l'utilisation des concepts et méthodes de l'approche dynamique pour l'étude de la mémoire, et de la cognition en général, n'est pas aisée. Contrairement à Kostrubiec (2001), nous pensons que la perspective représentationnelle des fonctions cognitives est compatible avec celles de l'approche dynamique. Mais leur prise en compte simultanée nécessite de nombreux aménagements d'un point de vue expérimental, ce qui a pour conséquence de nous éloigner des paradigmes classiques de la psychologie expérimentale et, de par des modélisations pour le moins innovantes, de rendre difficiles les interprétations au regard de la littérature classique.

Dans cette problématique, les modèles ARIMA nous sont apparus comme un outil offrant une alternative fructueuse aux modèles dynamiques non-linéaires qui nécessitent un très grand nombre de mesures et dont l'interprétation est complexe (parles en à Didier) et aux statistiques inférentielles classiques des protocoles à mesures répétées. Dans le cadre de notre travail, les modèles ARIMA se sont révélés robustes aux courtes séries temporelles, sensibles aux conditions expérimentales et « parlants » au niveau des interprétations. Nous espérons que ce travail empirique, bien qu'encore exploratoire, puisse démontrer ainsi l'intérêt de ces nouveaux outils dans l'étude des processus mnésiques.

REFERENCES